

Formale Entwicklung einer Steuerung für eine Fertigungszelle mit SYSYFOS

Jochen Burghardt

GMD Berlin

jochen@first.gmd.de

<http://www.first.gmd.de/persons/Burghardt.Jochen.html>

arXiv:1404.1227v1 [cs.LO] 4 Apr 2014

Technical Report
Arbeitspapiere der GMD 996
June 1996
ISSN 0723-0508

GMD – Forschungszentrum
Informationstechnik GmbH
D-53754 Sankt Augustin
Tel. *49-2241-14-0
Fax *49-2241-14-2618
Telex 889469 gmd d
<http://www.gmd.de>

Abstract. Using the synthesis approach of Manna and Waldinger, a formally specified and verified control circuitry for a production cell was developed. Building an appropriate formal language level, we could achieve a requirements specification to the informal description. We demonstrated that the paradigm of deductive synthesis can be applied to the development of complete verified systems, including hardware and mechanics. We defined two domain-specific logical operators that schematise frequent patterns in specification and proof and hence allow a more concise and expressive presentation.

In [Bur95], an english short version of this paper, without appendices, can be found.

Abstract. Mit Hilfe der deduktiven Programmsynthese nach Manna und Waldinger wird eine formal spezifizierte und verifizierte Steuerung für eine Fertigungszelle entwickelt. Durch die Erstellung einer geeigneten formalen Sprachebene unter starker Ausnutzung impliziter Spezifikationstechnik wird erreicht, daß die formale Anforderungsspezifikation einer satzweisen "Übersetzung" der informellen Beschreibung entspricht. Es wird demonstriert, wie das Paradigma der deduktiven Synthese zur Entwicklung ganzer verifizierter Systeme, einschließlich Hardware und Mechanik, angewendet werden kann. Es werden zwei anwendungsspezifische logische Operatoren definiert, die eine Schematisierung der in Spezifikation und Beweis häufig vorkommenden Aussagenmuster darstellen und mit deren Hilfe sich beide kürzer und klarer darstellen lassen.

In [Bur95] findet sich eine englische Kurzfassung dieses Papiers (ohne Anhänge).

1 Einleitung

Die Fallstudie “Fertigungszelle” kommt aus dem Bereich Regeln und Steuern. Aufgabe ist die Entwicklung verifizierter Steuerungs-Software für ein Modell einer Anlage, wie sie bei einer metallverarbeitenden Firma in Karlsruhe steht. Sie bearbeitet Metallrohlinge, die auf einem Zuführförderband an eine Presse gelangen. Ein Roboter nimmt die Metallrohlinge vom Zuführförderband und legt sie in die Presse. Der Roboterarm verläßt die Presse, die Presse verarbeitet die Metallrohlinge und öffnet sich wieder. Der Roboter nimmt das verarbeitete Metallplättchen aus der Presse und legt es auf ein Ablageförderband.

Ziel der Bearbeitung der Fallstudie war vor allem zu untersuchen, wie weit der begriffliche Abstand zwischen vorgegebener informeller Anforderungsbeschreibung und formaler Spezifikation verringert werden kann. Durch die Erstellung einer geeigneten formalen Sprachebene unter starker Ausnutzung impliziter Spezifikationstechnik und unter Einbeziehung auch mechanischer Aspekte konnte erreicht werden, daß die Spezifikation lokal validierbar ist, d.h. durch eine satzweise “Übersetzung” der Anforderungsbeschreibung in formale Notation entstanden ist. Insbesondere ist das Spezifikationsziel die formale Entsprechung der Anforderung: “Wenn ein unbearbeitetes Werkstück auf dem Zuführförderband liegt, erscheint es später bearbeitet auf dem Ablageförderband”. Mit dieser Herangehensweise kann das Problem der Vertrauenswürdigkeit einer Spezifikation weitgehend entschärft werden.

Die formale Spezifikation zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- Spezifikation in Prädikatenlogik 1. Stufe,
 - modular gegliedert,
 - Zeit als expliziter Parameter,
 - Einbeziehung auch mechanischer und geometrischer Aspekte,
 - Beschreibung der einzelnen Maschinen und ihrer Anordnung,
- nicht: Programmierung der Steuerung in einer Spezifikationssprache.

Daraus wurden mit Hilfe des Unterstützungswerkzeugs “SYSYFOS” notwendige Zeitbedingungen für die Steuerung der Fertigungszelle hergeleitet und schließlich eine TTL-artige digitale Hardware-Steuerschaltung konstruiert, die die Zeitbedingungen erfüllt.

Durch die Einbeziehung auch mechanischer und geometrischer Aspekte in die Modellierung konnte der Ansatz der deduktiven Synthese von der reinen Steuerungsentwicklung zu einem methodischen Rahmen für die integrierte Bearbeitung aller beim Entwurf der Fertigungszelle anfallenden ingenieurtechnischen Aspekte ausgeweitet werden. Zum Beispiel wurden auch notwendige Bedingungen an die Aufstellung der Maschinen (Abstände, Winkel, usw.) aus der Spezifikation hergeleitet.

Aufgrund der während der Entwicklung gemachten Erfahrungen wurden im Nachhinein zwei logische Operatoren definiert, die eine Schematisierung der in Spezifikation und Beweis häufig vorkommenden Aussagenmuster darstellen und mit deren Hilfe sich beide erheblich kürzer und klarer darstellen lassen. Beide Operatoren sind monoton bzw. anti-monoton in jeweils beiden Prädikatargumenten und konnten daher problemlos als benutzerdefinierte Junktoren in die verwendete polaritätsbasierte Nicht-Klausel-Resolution eingebaut werden. Zusammen mit einer Hintergrundtheorie über ihre wichtigsten Eigenschaften bilden sie eine Grundlage für die Bearbeitung zustandsorientierter Aspekte auf einem anwendungsnahen sprachlichen Niveau.

Nach einer informellen Aufgabenbeschreibung der Fertigungszelle in Abschnitt 2 und einem kurzen Überblick über die Methode der deduktiven Programmsynthese und das Unterstützungswerkzeug SYSYFOS in Abschnitt 3 werden das Vorgehen und die Erfahrungen beim Entwurf der Steuerungsschaltung in Abschnitt 4 diskutiert. In Abschnitt 5 wird das Vorgehen anhand der Entwicklung der Robotersteuerung konkretisiert, ein typischer Teil des maschinengeführten formalen Beweises ist in

Anhang C wiedergegeben. Abschnitt 6 geht auf die Verwendung höherer logischer Operatoren ein. In Abschnitt 7 erfolgt eine Bewertung der Fallstudie nach verschiedenen Gesichtspunkten.

2 Die Fallstudie “Fertigungszelle”

Die Fallstudie “Fertigungszelle”¹ ist eine Fallstudie aus dem Bereich Regeln und Steuern. Aufgabe ist die Entwicklung von verifizierter Steuerungs-Software für ein Modell einer Anlage, wie sie bei einer metallverarbeitenden Firma in Karlsruhe steht. Am Forschungszentrum Informatik (FZI) in Karlsruhe wurde ein Spielzeugmodell der Fertigungszelle mit Fischer-Technik realisiert, das über eine RS232-Schnittstelle angesteuert werden kann (Abb. 1).

Die Fertigungszelle (vgl. Abb. 2) bearbeitet Metallrohlinge, die auf einem Zuführförderband (zfb) an eine Presse (prs) gelangen. Ein Roboter (rob) nimmt die Metallrohlinge vom Zuführförderband und legt sie in die Presse. Der Roboterarm verläßt die Presse, die Presse verarbeitet die Metallrohlinge und öffnet sich wieder. Der Roboter nimmt das verarbeitete Metallplättchen aus der Presse und legt es auf ein Ablageförderband (afb).

Dieser grundlegende Ablauf wird durch weitere Mechanismen kompliziert:

- Um eine bessere Auslastung der Presse zu erzielen, wurde der Roboter mit zwei Armen ausgestattet. So kann der zweite Arm während des Pressens bereits einen neuen Rohling aufnehmen. Beide Arme stehen im unveränderlichen Winkel von 90° zueinander und können gemeinsam gedreht werden. Jeder der Arme kann horizontal ein- und ausgefahren werden. Die horizontale Beweglichkeit ist wegen der unterschiedlichen Abstände zum Drehzentrum des Roboters beim Be- und Entladen nötig.
- Die beiden Roboterarme befinden sich nicht auf der gleichen Höhe. Außerdem sind sie nicht vertikal beweglich. Deshalb wurde im Anschluß an das Zuführförderband ein Hubdrehtisch (hub) eingefügt. Er hat die Aufgabe, die Metallplättchen auf die Höhe des ersten Roboterarmes anzuheben und um etwa 45° zu drehen, so daß sie im richtigen Winkel von ihm aufgenommen und in die Presse gelegt werden können. Der Greifer des Roboterarms ist selbst nicht drehbar.
- Ebenfalls wegen des unterschiedlichen Niveaus der Roboterarme hat die Presse nicht nur zwei, sondern drei Zustände: geöffnet zur Entladung durch den unteren Arm (2), geöffnet zur Beladung durch den oberen Arm (1), geschlossen (pressend).
- Um das Modell bei Demonstrationen einsetzen zu können, soll der Fertigungsverfahren bedienungsunabhängig ablaufen können. Aus diesem Grund werden die “verarbeiteten” Metallplatten (von der Modell-Presse unverändert gelassen) vom Ablageförderband durch ein Handhabungsgerät (han) wieder zum Zuführförderband gebracht und der Gesamtvorgang dadurch zyklisch gemacht. Das Handhabungsgerät besitzt einen als Elektromagnet realisierten Greifer, der horizontal und vertikal beweglich ist. Die horizontale Beweglichkeit dient zur Bewältigung der Strecken zwischen den beiden Förderbändern, die vertikale Beweglichkeit ist notwendig, da die Bänder unterschiedlich hoch sind.

Der generelle Ablauf ist (sequentialisiert aus der Sicht eines Metallplättchens):

- Über das Zuführförderband gelangt das Metallplättchen auf den Hubdrehtisch.
- Der Hubdrehtisch wird in die dem aufnehmenden ersten Roboterarm angemessene Position gebracht.
- Der erste Roboterarm nimmt das Metallplättchen auf.
- Der Roboter dreht sich, so daß Arm 1 in die geöffnete Presse zeigt, legt das Metallplättchen dort ab und verläßt die Presse.

¹ Dieser Abschnitt entspricht der deutschen Fassung des zweiten Kapitels von [LL95] und wurde mir freundlicherweise von Thomas Lindner zur Verfügung gestellt.

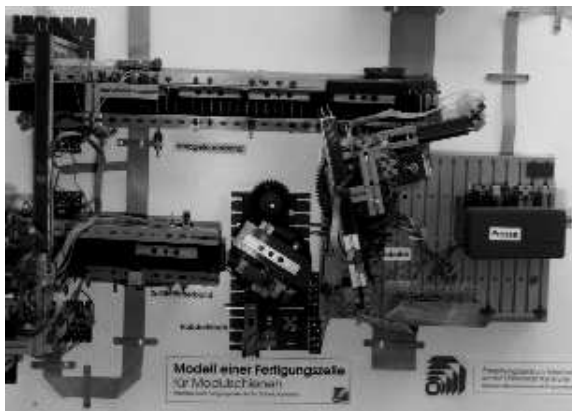


Fig. 1. FZI-Spielzeugmodell der Fertigungszelle

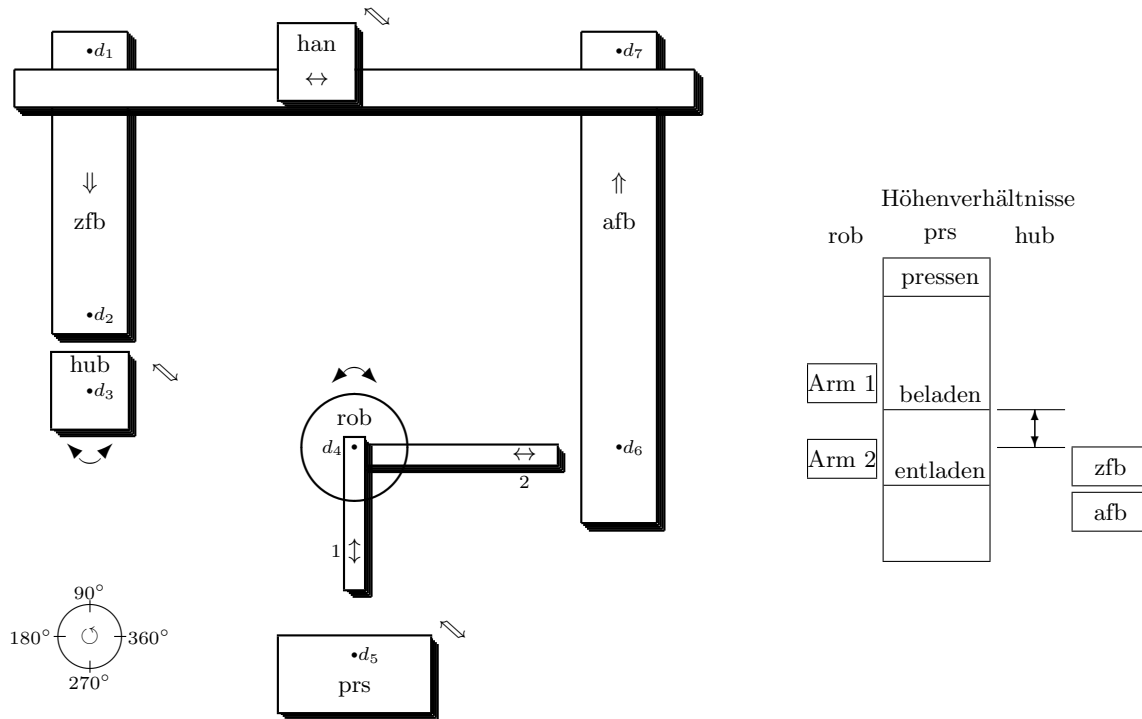


Fig. 2. Schematische Darstellung der Fertigungszelle

- Die Presse verarbeitet das Metallplättchen und öffnet sich wieder.
- Der Roboter nimmt mit seinem zweiten Arm das Metallplättchen auf, dreht sich weiter und legt das Metallplättchen auf das Ablageförderband.
- Über das Ablageförderband gelangt das Metallplättchen zum Handhabungsgerät.
- Das Handhabungsgerät nimmt das Metallplättchen auf, fährt zum Zuführförderband und legt das Metallplättchen dort wieder ab.

Dies ist eine vereinfachte Beschreibung. Dabei besteht die Vereinfachung zum einen in der groben Beschreibung der einzelnen Einheiten. Zum anderen ist die Anlage so ausgerichtet, daß mehrere Metallplatten gleichzeitig verarbeitet und transportiert werden; das soll gerade so geschehen, daß die Anlage optimal ausgenutzt ist. Abbildung 3 zeigt ein Zeitdiagramm für einen Durchlauf dreier Metallplättchen durch die Fertigungszelle, das Handhabungsgerät ist dabei weggelassen.

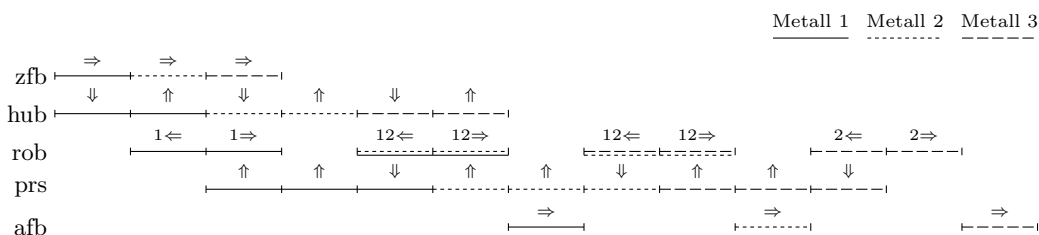


Fig. 3. Zeitdiagramm für den Durchlauf dreier Metallplättchen

2.1 Aktoren

Die Steuerung hat folgende Aktionsmöglichkeiten:

- Bewegung des unteren Teils der Presse (Elektromotor)
- Ein- und Ausfahren des Roboterarmes 1 (Elektromotor)
- Ein- und Ausfahren des Roboterarmes 2 (Elektromotor)
- Aufnehmen eines Metallteils durch Arm 1 (Elektromagnet)
- Aufnehmen eines Metallteils durch Arm 2 (Elektromagnet)
- Drehung des Roboters (Elektromotor)
- Drehung des Hubdrehtisches (Elektromotor)
- Höhenverstellung des Hubdrehtisches (Elektromotor)
- Horizontale Bewegung des Greifers des Handhabungsgerätes (Elektromotor)
- Vertikale Bewegung des Greifers des Handhabungsgerätes (Elektromotor)
- Aufnehmen eines Metallplättchens durch den Greifer des Handhabungsgerätes (Elektromagnet)
- Ein- und Ausschalten des Zuführförderbandes (Elektromotor)
- Ein- und Ausschalten des Ablageförderbandes (Elektromotor)

2.2 Sensoren

Die Steuerung erhält Informationen über folgende Sensoren:

- Ist die Presse in unterer Position? (Schalter)
- Ist die Presse in mittlerer Position? (Schalter)
- Ist die Presse in oberer Position? (Schalter)
- Wie weit ist Arm 1 ausgefahren? (Potentiometer)
- Wie weit ist Arm 2 ausgefahren? (Potentiometer)
- Wie weit ist der Roboter gedreht? (Potentiometer)
- Ist der Hubdrehtisch in unterer Position? (Schalter)
- Ist der Hubdrehtisch in oberer Position? (Schalter)
- Wie weit ist der Hubdrehtisch gedreht? (Potentiometer)
- Befindet sich das Handhabungsgerät über dem Zuführförderband? (Lichtschranke)
- Befindet sich das Handhabungsgerät über dem Ablageförderband? (Lichtschranke)
- In welcher vertikalen Position befindet sich der Greifer? (Potentiometer)
- Befindet sich ein Metallteil am äußersten Ende des Ablageförderbandes? (Lichtschranke)

Während Lichtschranken und Schalter ja/nein-Informationen liefern, besteht die Information eines Potentiometers aus einer Spannung, die im Beispiel der Drehung proportional zum Winkel ist.

2.3 Sicherheitsanforderungen

Die Steuerung soll verschiedenen Sicherheitsanforderungen genügen. Diese Sicherheitsanforderungen dienen unterschiedlichen Zwecken: zum einen gewährleisten sie, daß die Anlage sich nicht selbst zerstört (z.B. die Presse einen in ihr befindlichen Roboterarm), zum anderen schützen sie im Bereich der Anlage tätige Arbeiter.

1. Die Presse wird nur geschlossen, wenn sich keiner der Roboterarme in ihr befindet.
2. Ein Roboterarm wird nur vor die Presse gedreht, wenn der Arm eingefahren ist oder die Presse in oberer oder unterer Stellung ist.
3. Der Roboter wird nicht weiter als nötig nach links und rechts gedreht, da er sonst möglicherweise andere Teile der Anlage (z.B. den Hubdrehtisch) beschädigen könnte.

4. Sämtliche Elektromotoren werden sofort gestoppt, wenn ein dadurch bewegtes Gerät an den Rand seiner Beweglichkeit gerät. Zum Beispiel wird das Handhabungsgerät in seiner horizontalen Bewegung gestoppt, sobald einer der beiden Schalter signalisiert, daß es über einem Band steht.
5. Der Hubdrehtisch wird nicht unter das Niveau des Förderbandes bewegt. Er wird in unteren Stellungen nicht gedreht.
6. Das Handhabungsgerät stößt nicht seitlich gegen ein Förderband. Dies geschieht zum Beispiel, wenn das Handhabungsgerät auf dem Niveau, auf dem es vom Ablageförderband aufnimmt, ohne vertikale Bewegung hin zum Zuführförderband fährt. Außerdem stößt das Handhabungsgerät nicht von oben gegen Zuführ- oder Ablageförderband.
7. Ein Elektromagnet wird nur deaktiviert, wenn der zugehörige Roboterarm bzw. Greifer in einer Position ist, in der gefahrlos abgeladen werden kann. Gefahrlos abgeladen werden kann über Förderbändern, in der Presse und über dem Hubdrehtisch, vorausgesetzt der Abstand zwischen Magnet und Ablagefläche ist genügend klein.
8. Das Ablageförderband transportiert höchstens dann, wenn sich kein Fertigteil im Aufnahmebereich des Handhabungsgeräts befindet.
9. Damit ein Metallteil vom Zuführförderband auf den Hubdrehtisch übergeht, muß der Tisch in entsprechender Position sein.
10. (Das Zuführförderband darf nur dann Metallplättchen transportieren, wenn der Hubdrehtisch leer ist.)

3 Deduktive Programmsynthese

In diesem Abschnitt wird die zur Entwicklung der Fertigungszelle verwendete formale Methode der deduktiven Programmsynthese nach Manna und Waldinger [MW80] kurz vorgestellt. Ihre grundlegende Vorgehensweise besteht darin, die Erfüllbarkeit einer gegebenen prädikatenlogischen Spezifikation konstruktiv zu beweisen. Dabei entsteht aus den auftretenden Antwort-Substitutionen gleichzeitig das zu synthetisierende funktionale Programm, das die Spezifikation erfüllt.

Die Beweisregeln umfassen Resolution auch für Formeln, die nicht in Klausel-Normalform vorliegen, sowie die in [MW86] beschriebenen Verallgemeinerungen von E-Resolution und Paramodulation. Es gibt eine \vee -Split-Regel für Goals und eine \wedge -Split-Regel für Assertions, aber nicht umgekehrt. Rekursive Programme lassen sich mit Hilfe struktureller Induktion erzeugen, wobei die Terminierungsordnung vom Benutzer angegeben werden muß. Es kann gezeigt werden, daß dieses Ableitungssystem für Logik erster Stufe vollständig ist.

Das nach diesem Ansatz prototypisch in PROLOG implementierte SYSFOS-System (siehe Abb. 4) arbeitet auf einer Datenbasis aus Formeln (*Assertions*, *Goals*), denen teilweise ein Term als Antwortsubstitution (*Output*) zugeordnet ist. Jede Formel ist eindeutig numeriert (*Nr*). Unter *Orig* wird die Beweisoperation abgespeichert, aus der die Formel entstanden ist. Folgende Operationen sind auf dieser Datenbasis definiert:

- Nicht-Klausel-Resolution (*rs*),
- Paramodulation bzw. allgemeiner: Relation Replacement (*rp*),
- E-Resolution bzw. allgemeiner: Relation Matching (*rm/2*),
- Monotonie-Regel (*rm/1*),
- Unifikation zweier Teilformeln bzw. explizite Faktorisierung (*un*),
- Aufspalten in Teilformeln (*sp*),
- Logische Transformationen (*tf*),
- Konkretisierung von Skolem-Konstanten entsprechend ihres Typs (*co*),
- Generierung einer Induktionshypothese aus einer Spezifikation (*hy*).

Das Ergebnis einer Operation wird von einem Formelvereinfacher (*simp*) auf eine möglichst einfache Form gebracht, bevor es in die Datenbasis abgespeichert wird. Im Folgenden werden die für die Fallstudie benötigten Operationen und Komponenten kurz erläutert.

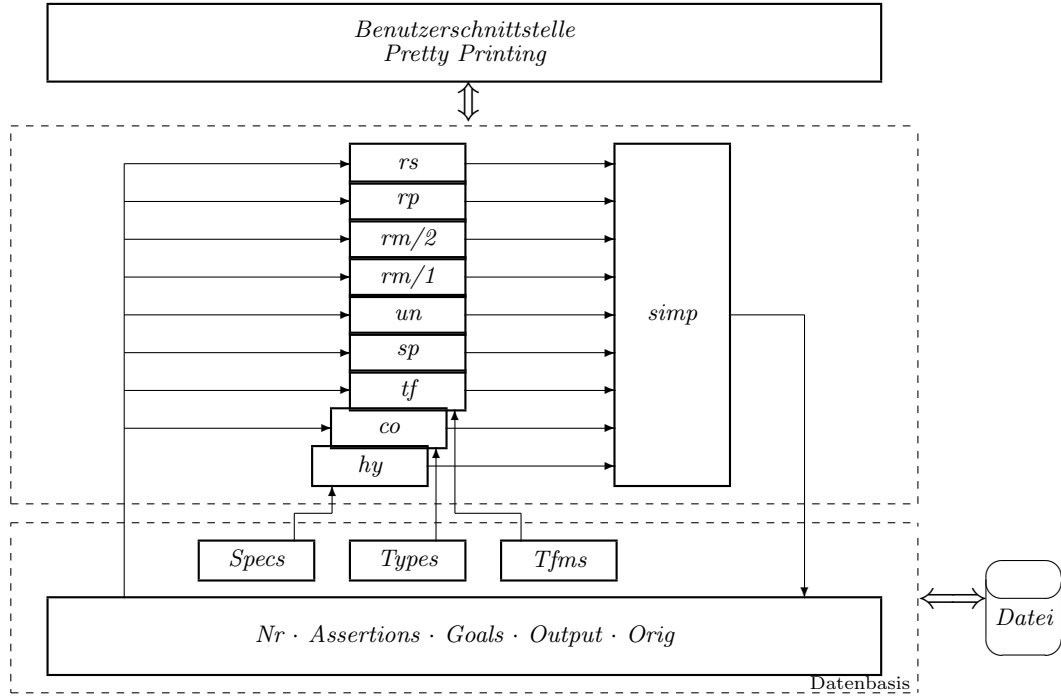


Fig. 4. Struktur des SYSYFOS-Systems

3.1 Nicht-Klausel-Resolution

Die seinerzeit von Robinson eingeführte Resolutionsmethode [Rob65] setzt voraus, daß die zu resolvierenden Formeln in konjunktive Normalform und weiter in Klauselnormform überführt worden sind. Demgegenüber geben Manna und Waldinger in [MW80] eine Form der Resolution an, die auf beliebigen Formeln arbeitet (Nicht-Klausel-Resolution). Dadurch wird die Lesbarkeit von Zwischenergebnissen im Beweis stark erhöht, was für ein interaktives System eine unbedingte Notwendigkeit ist. Die Lesbarkeit wird ebenfalls durch die Schreibweise in zwei Spalten (Assertions, Goals) gesteigert, wobei logisch gesehen die Formeln in der Goal-Spalte implizit negiert sind. Das SYSYFOS-System arbeitet nicht mit der in [MW80] verwendeten Resolutionsregel, sondern mit der etwas leistungsfähigeren Regel von Schmerl [Sch88], die in [Haa92] entsprechend angepaßt wurde.

Abbildung 5 zeigt in den Schritten 1 bis 3 und in den Schritten 4 bis 7 ein konkretes Beispiel der Nicht-Klausel-Resolution. Der dabei wie auch im folgenden verwendete Begriff der Polarität einer Teilformel p innerhalb einer Formel $F[p]$ gibt an, ob p unter einer geraden (Polarität “+”) oder ungeraden (“−”) Anzahl von Negationen vorkommt. Die Multiplikation zweier Polaritäten sowie einer Polarität mit einer Teilformel ist entsprechend definiert, vgl. [St60].

3.2 Paramodulation

In [MW86] definieren Manna und Waldinger unter dem Namen “Relation Replacement” (rp in Abb. 4) eine Verallgemeinerung der Paramodulation, die erstens keine Klauselform voraussetzt und zweitens nicht nur bzgl. einer Äquivalenzrelation “=”, sondern bzgl. beliebiger Relationen “ \preceq ” arbeitet, sofern die entsprechenden Funktionen und Prädikate monoton sind (Schritte 8 bis 10 in Abb. 5). Im SYSYFOS-System wird zusätzlich gefordert, daß \preceq transitiv ist, dann dürfen in G auch mehrere Ersetzungen von s und t vorgenommen werden.

	Assertions Goals	
Resolution:		
1	$F[p^m]$	
2	$G[p^{-m}]$	
3	$F[\neg m \cdot G[(-m) \cdot true]]$	rs(1,2)
Beispiel:		
4	$rob(R) \wedge T_0 \leq t \leq T_1 \rightarrow drv(R, t)$	
5	$val(C_7, T) = 1 \rightarrow drv(r(C_7), T)$	
6	$rob(r(C_7)) \wedge T_0 \leq t \leq T_1 \rightarrow \neg(val(C_7, t) = 1 \rightarrow \neg true)$	rs(4,5)
7	$rob(r(C_7)) \wedge T_0 \leq t \leq T_1 \rightarrow val(C_7, t) = 1$	simp(6)
Paramodulation:		
8	$F[s \preceq t]$	
9	$G\langle t^+, s^- \rangle$	
10	$\neg F[false] \wedge G\langle s^+, t^- \rangle$	rp(8,9)
Beispiel:		
11	$ha_1(R, S, T) \rightarrow win(S, T) = wxy(x, ps_1(R, T)) - 90$	
12	$win(s_0, t) = 180$	
13	$\neg(ha_1(R, s_0, t) \rightarrow false) \wedge wxy(x, ps_1(R, t)) - 90 = 180$	rp(11,12)
14	$ha_1(R, s_0, t) \wedge wxy(x, ps_1(R, t)) - 90 = 180$	simp(13)
E-Resolution:		
15	$F[P(s^+)^m]$	
16	$G[P(t)^{-m}]$	
17	$F[\neg m \cdot G[(-m) \cdot (t \preceq s)]]$	rm(15,16)
Beispiel:		
18	$rob \wedge win(s_0, T) = w_0$	
19	$(T_0 \leq t \leq t_1 \rightarrow drv(t)) \rightarrow wxy(t_1) = A$	
20	$rob \wedge \neg((T_0 \leq t \leq t_1 \rightarrow drv(t)) \rightarrow \neg win(s_0, T) = wxy(t_1))$	rm(18,19)
21	$rob \wedge (T_0 \leq t \leq t_1 \rightarrow drv(t)) \wedge win(s_0, T) = wxy(t_1)$	simp(20)
Monotonie-Regel:		
22	$f(s^+, t^-) \preceq f(u^+, v^-)$	
23	$s \preceq u \wedge v \preceq t$	rm(22)
Beispiel:		
24	$wxy(x_1, x_2) = wxy(x_3, x_4)$	
25	$x_1 = x_3 \wedge x_2 = x_4$	rm(24)

Dabei sei m bzw. $-m$ die Polarität von p , angedeutet durch p^m bzw. p^{-m} . Für Terme s und t bedeute $G\langle s^+, t^- \rangle$, daß G bzgl. \preceq im ersten Argument monoton wachsend und im zweiten monoton fallend ist. In den Beispielen ist die Relation " \preceq " die Gleichheit. Großgeschriebene Namen bezeichnen Variablen, kleingeschriebene Konstanten. Die rechte Seite gibt an, wie die aktuelle Formel entstanden ist.

Fig. 5. Verwendete Beweisregeln

3.3 E-Resolution

Ebenfalls in [MW86] wird eine entsprechende Verallgemeinerung der E-Resolution auf Nicht-Klausel-Form und beliebige Relationen definiert und “Relation Replacement” genannt (*rm/2* in Abb. 4). Das SYSYFOS-System arbeitet hier mit einer für E-Resolution modifizierten Version der Schmerl-Regel (Schritte 15 bis 17 in Abb. 5, vgl. [Bur89]). Daneben ist noch eine Operation zur Anwendung der Monotonie-Regel definiert, ebenfalls für beliebige transitive Relationen (Schritte 22 bis 23 in Abb. 5).

3.4 Vereinfacher

Nach jedem Beweisschritt im System wird das Ergebnis durch einen Vereinfacher geschickt, wobei nicht nur die Idempotenz-, sondern auch die Absorptionsgesetze angewendet werden, um mehrfach vorkommende Teilformeln zu vermeiden (Faktorisierung, vgl. [Sch88]). Zusätzlich kann der Benutzer durch eine entsprechende Option die Überführung in eine linksassoziative Negationsnormalform veranlassen, was sich während der Fallstudie als positiv für die Lesbarkeit herausgestellt hat.

In [Moh91] wurde als Anwendungsfallstudie mit Hilfe des SYSYFOS-Systems ein Algorithmus zum Finden der gemeinsamen Teilterme eines Terms synthetisiert, der künftig als verifizierte Komponente innerhalb des Formelvereinfachers (Faktorisierung) des Systems selbst eingesetzt werden soll.

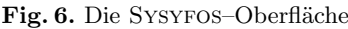
3.5 Benutzeroberfläche

Während der Bearbeitung der Fallstudie Fertigungszelle wurde parallel das SYSYFOS-System weiterentwickelt und u.a. um eine halbgraphische Benutzeroberfläche zur Darstellung von Formel- und Beweisbäumen und Auswahl von Teilbäumen für Beweisoperationen ergänzt, die weitgehend unabhängig vom unterliegenden Fenstersystem und vom eigentlichen Beweissystem verwendbar ist. Sie erlaubt neben einer flexiblen Layout-Festlegung für Formelbäume die wahlweise Aus- und Einblendung der Argumente von Skolemfunktionen, die Navigation innerhalb eines Formelbaums und die gezielte Suche in einer Menge von Formeln (z.B. Spezifikationsaxiomen).

Abbildung 6 zeigt als Beispiel die SYSYFOS-Benutzeroberfläche während des ersten Resolutionsschritts aus Anhang C. In den Fenstern “show1” und “show2” werden die aktuellen Elternformeln in halbgraphischer Notation angezeigt, das Fenster “tab” zeigt eine Tabelle aller bisher abgeleiteten Formeln. Im Hauptfenster (“SYSYFOS”) wurde der Resolutionsbefehl eingegeben, nachdem in den Fenstern “show1” und “show2” die zu resolvierenden Teilformeln durch entsprechende Navigationskommandos ausgewählt wurden. Die Angaben in der Titelzeile des Fensters “show1” besagen, daß die angezeigte Formel die Nummer 116 hat, eine Assertion ist, aus der Operation *split* 112, [2] entstanden ist, und daß in ihr die Teilformel 1.2 ausgewählt wurde (siehe auch die Cursor-Position im Fenster). Entsprechendes gilt für das Fenster “show2”. Für die Formelsyntax siehe Abb. 18. Die vorkommenden Variablennamen weichen von Anhang C ab, da letztere aus Darstellungsgründen systematisch umnummeriert wurden.

3.6 Beweiswiederholung

Das SYSYFOS-System verfügt über einen Mechanismus zum Nachspielen bereits gefundener Beweisteile, der auch noch nach leichten Änderungen der Spezifikation verwendet werden kann. Beweisteile können als Terme abgespeichert werden, wobei jeder Beweisoperation aus Abb. 4 ein Funktionssymbol entspricht und jedem Axiom sein eindeutiger benutzerdefinierter Name als Konstante. Abbildung 12 zeigt die Termdarstellung des Beweises aus Abb. 10. Der Name eines Axioms ist von seiner Formelnummer zu unterscheiden: während sich letztere zwischen verschiedenen Sitzungen am



SYSFOS-System ändern kann (z.B. durch Umordnung der Axiome), bleibt ersterer stets gleich, was für das Beweis-Nachspielen unumgänglich ist. Weiterhin wurden neue, abgeleitete Beweisoperationen definiert, die weniger empfindlich gegen Änderungen der Ausgangsformeln sind. So wurde z.B. die in [MW80] vorgesehene explizite Instanziierung einer Formel ersetzt durch die Unifikation zweier Teilformeln, da letztere unempfindlich gegen gebundene Umbenennung ist, wie sie häufig durch die automatisch erzeugten Variablennamen vorkommt.

4 Entwurf

4.1 Anforderungsspezifikation

Es ist bekannt, daß der Übergang von einer informellen Anforderungsbeschreibung zu einer formalen Spezifikation der bzgl. der Korrektheit problematischste Schritt innerhalb des formalen Vorgehensmodells ist, da die formale Spezifikation naturgemäß nicht gegen die informelle Beschreibung verifiziert werden kann. In der vorliegenden Fallstudie haben wir versucht, einen Ansatz zu verfolgen, der dieses Problem so weit als möglich entschärft. Wir haben eine formale Sprachebene geschaffen, in der die informelle Beschreibung aus Abschnitt 2 quasi 1:1 ausgedrückt und dadurch leicht validiert werden kann. Die so erhaltene Spezifikation ist eine *Anforderungs*-Spezifikation, keine Entwurfsspezifikation. Durch ihren hohen Grad an Implizitheit gestattet sie weder ein “rapid prototyping” noch die unmittelbare schrittweise Verfeinerung in ausführbaren Code.

Zuerst wurde eine geeignete Terminologie, bestehend aus Prädikaten- und Funktionssymbolen und ihren informellen Bedeutungen, festgelegt (siehe Anhang A). Die Zeit wurde mit Hilfe expliziter Parameter modelliert, um innerhalb der Prädikatenlogik erster Ordnung zu bleiben und um explizite Aussagen über Zeitpunkte machen zu können. Der Raum wurde durch dreidimensionale kartesische Koordinatenvektoren modelliert, wobei Transformationen von und nach Polarkoordinaten soweit als notwendig axiomatisiert wurden. Das gewünschte “Programm” soll aus einer asynchronen Hardware-Schaltung bestehen. Sie wird aus TTL-artigen Komponenten aufgebaut, die formal durch zeitabhängige Funktionen dargestellt sind, wobei die Schaltzeiten ignoriert werden. Explizite Rückkoppelungen in der Schaltung sind nicht erlaubt, da sie auf der formalen Seite zu unendlichen Termen führen würden, die vom Beweiswerkzeug nicht unterstützt werden. Stattdessen wurden die notwendigen Rückkoppelungen in Bauelementen wie Flip-Flops eingekapselt.

Auf dieser Grundlage konnte in einem nächsten Schritt eine Sammlung offensichtlicher Fakten über das Verhalten der einzelnen Maschinen formalisiert werden, siehe Anhang B. Diese formale Spezifikation besteht aus vier Teilen:

- der von jedem einzelnen Maschinentyp verlangten Verhaltensbeschreibung,
- der Verhaltensbeschreibung der einzelnen Hardware-Bauelemente,
- den benötigten Hintergrundfakten aus Geometrie, Arithmetik und Physik und
- der eigentlichen Spezifikation der Aufgabe der Fertigungszelle.

Die Spezifikation ist *lokal verstehbar* in dem Sinne, daß es zur Validation eines Axioms genügt, nur dieses eine Axiom mit Hilfe der Terminologiedefinitionen gegen seine informelle Beschreibung zu überprüfen.

Die Spezifikation wurde in der naheliegenden Weise modularisiert. Für jeden Maschinentyp existiert ein Modul, das das von ihm verlangte Verhalten formal beschreibt, daneben gibt es drei weitere Spezifikationsmodule, in denen das Verhalten der Hardware-Bauelemente, der Gesamtaufbau der Fertigungszelle sowie die benötigten Hintergrundfakten aus Mathematik und Physik enthalten sind. Man beachte, daß keines dieser Module zu einem Teil der Implementierung korrespondiert in dem Sinne, daß letzterer durch eine Folge von Entwicklungsschritten aus ersterem gewonnen werden könnte. Die Spezifikationsmodule beschreiben verschiedene Aspekte der modellierten Realität, nicht der Implementierung.

Diese Herangehensweise machte auch formal die Sinnlosigkeit einer “Fertigungs”-Zelle deutlich, deren einziger Zweck darin besteht, Metallplättchen in einem Kreis zu bewegen, da es nicht möglich war, eine Spezifikationsformel dafür anzugeben, die nicht auch von einer leeren Zelle ohne alle Maschinen erfüllt worden wäre. Daher versahen wir das Handhabungsgerät mit der zusätzlichen Fähigkeit, Metallplättchen zu konsumieren, d.h. sie in den unbearbeiteten Zustand zurück zu überführen, und stellten zwei separate Spezifikationsformeln auf: eine für den Konsumenten, das Handhabungsgerät,

und eine für den Produzenten, den Rest der Fertigungszelle. Letztere besteht in einer formalen Übersetzung der Anforderung: “Wenn ein unbearbeitetes Metallplättchen auf dem Zuführförderband liegt, erscheint es irgendwann später in bearbeitetem Zustand auf dem Ablageförderband.”

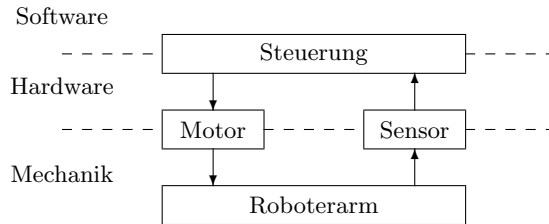


Fig. 7. Steuerschleife mit mechanischer Rückkopplung

4.2 Einbeziehung der Mechanik

Die Verwendung von Prädikatenlogik mit expliziter Zeit als Spezifikationssprache erlaubt es, die vorgegebenen technisch-physikalischen Anforderungen mit in die Spezifikation einzubeziehen und dadurch auch Systeme mit Rückkopplungsschleifen zu behandeln, die teilweise außerhalb des Bereichs der Hardware bzw. Software liegen. Zum Beispiel fährt die Robotersteuerung in einigen Situationen einen der Arme soweit aus, bis er eine bestimmte Länge erreicht, siehe Abb. 7. Es ist unmöglich zu beweisen, daß der Roboterarm tatsächlich die gewünschte Länge erreichen und dann anhalten wird, ohne die mechanischen Eigenschaften des Arms miteinzubeziehen. Das Gleiche gilt für die gesamte Fertigungszelle: um das oberste Spezifikationsziel zu beweisen, daß sie bearbeitete Metallplättchen aus unbearbeiteten produziert, ist die formale Behandlung ihres mechanischen Verhaltens im Beweis notwendig; es genügt nicht, den Beweis auf die reinen Software- bzw. Hardware-Aspekte zu beschränken.

Darüber hinaus ist es möglich, notwendige Bedingungen formal herzuleiten, die die Konfiguration außerhalb des Hardware/Software-Bereichs betreffen. So wurde z.B. gezeigt, daß der vom Anfangspunkt des Ablagebands, dem Drehzentrum des Roboters und der Presse gebildete Winkel notwendig 90° betragen muß, damit die bearbeiteten Metallplättchen in der richtigen Ausrichtung auf dem Band abgelegt werden. Der deduktive Ansatz konnte somit zu einem methodischen Rahmen für die Entwicklung der gesamten Fertigungszelle, einschließlich mechanischer Aspekte, erweitert werden. Es ist denkbar, daß ein Ingenieur in Zukunft eine formale Anforderungsbeschreibung der gewünschten Fertigungszelle vom Auftraggeber erhält und eine formale Verhaltensbeschreibung der Maschinen von deren Hersteller. Daraus könnte er dann einen verifizierten Gesamtentwurf der Zelle erstellen, einschließlich ihrer Steuerungs-Software und ihres mechanischen Aufbaus. Die deduktive Synthese dient dabei als der Rahmen, innerhalb dessen klassischer mechanischer Entwurf und Software-Entwurf integriert wird.

4.3 Zeitmodellierung

Schließlich soll eine eher überraschende Erfahrung mit der Zeitmodellierung erwähnt werden, die zeigt, wieviel Sorgfalt die Formalisierung des Hintergrundwissens für die Anforderungsspezifikation erfordert. Wir beziehen uns wieder auf die Steuerschleife aus Abb. 7. An einer bestimmten Stelle im Beweis ist es notwendig zu zeigen, daß es einen Zeitpunkt t_2 gibt, an dem der Roboterarm die gewünschte Länge erreicht, sofern seine Länge zu einem gegebenen Zeitpunkt t_1 kleiner war. Aus der formalen Verhaltensbeschreibung des Roboters wissen wir, daß der Arm irgendwann jede

vorgegebene Länge (innerhalb seiner Grenzen) erreichen wird, wenn der Ausfahrmotor nur lange genug läuft.

Für den Korrektheitsbeweis der obigen Steuerschleife benötigen wir jedoch die Existenz eines *frühesten* Zeitpunkts, an dem die gewünschte Länge erreicht wird, um den Ausfahrmotor genau zu diesem Zeitpunkt anzuhalten. Es genügt daher nicht, die Zeit durch rationale Zahlen zu modellieren, da diese nicht abgeschlossen gegen Infima sind. Wenn z.B. die gewünschte Länge zufällig so gewählt ist, daß sie erreicht wird, wenn $(t_2 - t_1)^2 = 2$ ist, dann ist sie zu jedem Zeitpunkt $t_2 > t_1 + \sqrt{2}$ erreicht und überschritten, aber es gibt kein minimales (rationales) t_2 . Dieses Problem wurde umgangen, indem in den Spezifikationsaxiomen zusätzlich die Existenz frühester Zeitpunkte gefordert wurde, vgl. z.B. Axiom *u16* in Anhang B.

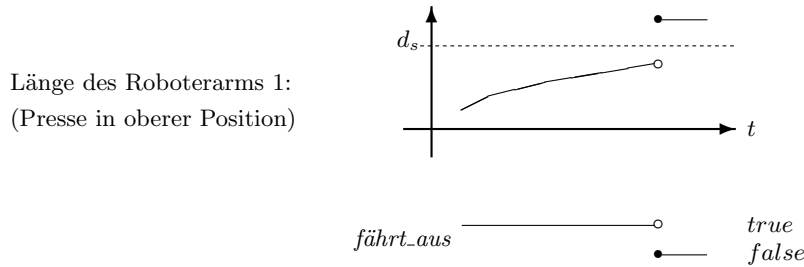


Fig. 8. Verletzung einer Sicherheitsanforderung durch unstetige Bewegung

Eine der Hauptschwierigkeiten beim Finden des Beweises bestand darin, die notwendigen Voraussetzungen über die Stetigkeit bestimmter Funktionen in einfachen Rückkopplungsschleifen explizit zu machen. In ersten Versionen der Spezifikation waren sie vergessen worden, was erst aufgrund der Analyse fehlgeschlagener Beweisversuche bemerkt wurde. Eine der Sicherheitsanforderungen besagt z.B., daß der erste Roboterarm nur dann in den Bereich der Presse gelangen darf, wenn diese in ihrer mittleren Position steht. Angenommen, die Steuerschaltung stoppt den Roboterarm, bevor er sich auf einen Mindestabstand d_s der Presse nähert, sofern diese nicht in ihrer mittleren Position steht, und stellt auch sicher, daß die Presse in der mittleren Position verharret, solange der Roboterarm innerhalb des Abstands d_s bleibt. Der Beweis dafür, daß eine solche Schaltung die obige Sicherheitsanforderung erfüllt, benötigt unerwarteterweise den Zwischenwertsatz aus der Analysis. Abbildung 8 zeigt ein Gegenbeispiel, falls die Bewegung des Roboterarms nicht stetig ist, die Presse stehe dabei in ihrer oberen Position. Daher mußte für jede Funktion, deren Stetigkeit verlangt wird, eine entsprechende Instanz des Zwischenwertsatzes zur Spezifikation hinzugefügt werden.

4.4 Verifikation

Die Steuerschaltung wurde nicht wirklich synthetisiert in dem Sinne, daß aus einem aktuellen Teilbeweisziel viele Informationen über die zu synthetisierende Schaltung gewonnen worden wären. Stattdessen wurde eher eine vorher unabhängig vom Beweis gefundene Schaltung verifiziert. Darüber hinaus ist die Wiederverwendung früherer Beweisteile erheblich einfacher, wenn die Beweise vorwärts (bottom-up) durchgeführt werden, während eine echte Synthese Rückwärtsbeweise (top-down) verlangt. Aus diesem Grund wurden große Teile des Beweises rückwärts geführt, vgl. Abb. 10 und Anhang C.

Es wurden zwei verschiedene Ansätze untersucht, eine Steuerungsschaltung für die Fertigungszelle zu synthetisieren. Der erste Ansatz verwendete ausschließlich Prädikatenlogik erster Ordnung. Er ging aus von der oben beschriebenen Spezifikation und bewies ihre Erfüllbarkeit. Da Spezifikation und Verifikation der vollen Fertigungszellensteuerung bereits sehr kompliziert und unübersichtlich sind, soll

- u20.** $\forall[r, x, t, d] \text{ (}$
 $\text{roboter}(r, x)$
 $\wedge \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t)) \leq d \leq \text{maxlg}_1$
 $\rightarrow (\forall[t_1] (t \leq t_1 < \text{tra}_1(r, d, t) \rightarrow \text{faehrt_aus}_1(r, t_1)) \rightarrow \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, \text{tra}_1(r, d, t))) = d)$
 $\wedge \forall[t_3] (t \leq t_3 < \text{tra}_1(r, d, t) \rightarrow \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t_3)) < d))$
- u21.** $\forall[r, x, t, t_2] \text{ (}$
 $\text{roboter}(r, x)$
 $\wedge t \leq t_2$
 $\wedge \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t)) < \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t_2))$
 $\rightarrow \exists[t_1] (t < t_1 < t_2 \wedge \text{faehrt_aus}_1(r, t_1))$
- u30.** $\forall[c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3, x, t] \text{ (}$
 $\text{roboter}(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), x)$
 $\rightarrow (\text{faehrt_aus}_1(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_1, t) = 1)$
 $\wedge (\text{faehrt_ein}_1(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_2, t) = 1)$
 $\wedge (\text{faehrt_aus}_2(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_3, t) = 1)$
 $\wedge (\text{faehrt_ein}_2(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_4, t) = 1)$
 $\wedge (\text{greift}_1(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_5, t) = 1)$
 $\wedge (\text{greift}_2(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_6, t) = 1)$
 $\wedge (\text{dreht_vor}(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_7, t) = 1)$
 $\wedge (\text{dreht_zurueck}(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_8, t) = 1)$
 $\wedge (\text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t)) = \text{val}(s_1, t))$
 $\wedge (\text{dist_xy}(x, \text{pos}_2(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t)) = \text{val}(s_2, t))$
 $\wedge (\text{winkel_xy}(x, \text{pos}_1(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t)) = \text{val}(s_3, t)))$
- u47b.** $\text{dist_xy}(d_4, d_3) \leq \text{maxlg}_1$
- u73.** $\forall[c, v, t] \text{ (}$
 $\text{val}(\text{trigger}(c, v), t) = 1$
 $\leftrightarrow \text{val}(c, t) < v)$
- r11.** $\text{roboter}(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), d_4)$

Fig. 9. Spezifikation der einfachen Steuerungsschaltung

Finde eine Steuerungsschaltung, die den ersten Roboterarm auf eine vorgegebene Länge d_{34} ausfährt.

Formal: $\exists r_0 : \forall t_0 : \exists t \quad dist_xy(d_4, pos1(r_0, t_0)) \leq d_{34}$
 $\rightarrow dist_xy(d_4, pos1(r_0, t)) = d_{34}$
mit $d_{34} = dist_xy(d_4, d_3)$

Beweis (Skolem-Funktionen markiert mit “ $\$$ ”):

Vor: $dist_xy(d_4, pos1(r_0, t_0^\$)) \leq d_{34}$

Beh: $dist_xy(d_4, pos1(r_0, t)) = d_{34}$

51 = u20 rs Vor , r11 , u47b:

$(t_0^\$ \leq t_1 < t_2^\$ \rightarrow faehrt_aus1(r_0, t_1))$
 $\rightarrow dist_xy(d_4, pos1(r_0, t_2^\$)) = d_{34}$
 $\wedge t_0^\$ \leq t_3 < t_2^\$ \rightarrow dist_xy(d_4, pos1(r_0, t_3)) < d_{34}$

52 = sp 51: $(t_0^\$ \leq t_1 < t_2^\$ \rightarrow faehrt_aus1(r_0, t_1))$
 $\rightarrow dist_xy(d_4, pos1(r_0, t_2^\$)) = d_{34}$

53 = sp 51: $t_0^\$ \leq t_3 < t_2^\$ \rightarrow dist_xy(d_4, pos1(r_0, t_3)) < d_{34}$

54 = 52 rs u30: $(t_0^\$ \leq t_1 < t_2^\$ \rightarrow val(c_1, t_1) = 1)$
 $\rightarrow dist_xy(d_4, pos1(r_0, t_2^\$)) = d_{34}$

55 = 54 rs u73: $(t_0^\$ \leq t_1 < t_2^\$ \rightarrow val(c, t_1) < d_{34})$
 $\rightarrow dist_xy(d_4, pos1(r_0, t_2^\$)) = d_{34}$
mit $r_0 = r(trigger(c, d_{34}), c_2, c_3, \dots, c_8, s_1, s_2, s_3)$

56 = 55 rp u30: $(t_0^\$ \leq t_1 < t_2^\$ \rightarrow dist_xy(d_4, pos1(r_0, t_1)) < d_{34})$
 $\rightarrow dist_xy(d_4, pos1(r_0, t_2^\$)) = d_{34}$
mit $r_0 = r(trigger(s_1, d_{34}), c_2, c_3, \dots, c_8, s_1, s_2, s_3)$

57 = 56 rs 53: $dist_xy(d_4, pos1(r_0, t_2^\$)) = d_{34}$
mit $r_0 = r(trigger(s_1, d_{34}), c_2, c_3, \dots, c_8, s_1, s_2, s_3)$

Fig. 10. Synthesebeweis der Schaltung aus Abb. 11

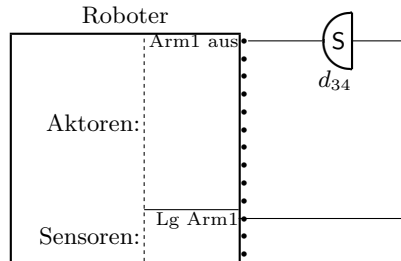


Fig. 11. Einfache Steuerungsschaltung

hier als Beispiel für einen Synthesebeweis die stark vereinfachte fiktive Aufgabe aus Abb. 7 dienen, einen Roboterarm auf eine bestimmte Länge auszufahren. Abbildung 9 faßt die dafür benötigten Spezifikationsaxiome aus Anhang B zusammen, Abb. 10 zeigt den Synthesebeweis, Abb. 11 zeigt die synthetisierte Schaltung selbst.

In Abschnitt 5 wird die formale Entwicklung der Robotersteuerung gezeigt. In Abschnitt 6 wird der zweite Ansatz vorgestellt, der aufgrund der gemachten Erfahrungen mit der Modellierung des Anwendungsgebiets neue logische Operatoren definierte und dadurch Spezifikation und Beweis kürzer und übersichtlicher zu gestalten erlaubte.

$$rs(rp(rs(rs(sp(lab(l1, rs(rs(rs(user(u20), user(r11)), user(Vor)), user(u47b)))), user(u30)), user(u73)), user(u30)), sp(ref(l1)))$$

Fig. 12. Termdarstellung des Beweises aus Abb. 10

5 Entwicklung der Robotersteuerung

Im folgenden soll das Vorgehen beim Entwurf anhand der Steuerung des Roboters erläutert werden, die wegen der Koordinationsprobleme der beiden Arme die schwierigste von allen vorkommenden Maschinensteuerungen darstellt. Beim Roboter lassen sich vier teilweise ineinander verzahnte Bewegungsphasen unterscheiden:

1. Arm 1 nimmt ein Metallplättchen vom Hubdrehtisch auf und transportiert es in die Presse.
2. Arm 2 nimmt ein bearbeitetes Metallplättchen von der Presse auf und transportiert es auf das Ablageförderband.
3. Arm 1 fährt von der Presse (leer) zurück zum Hubdrehtisch.
4. Arm 2 fährt vom Ablageförderband (leer) zurück zur Presse.

Aufgrund der Konstruktion des Roboters können die Phasen 1. und 2. sowie die Phasen 3. und 4. immer nur gleichzeitig ablaufen.

Ph	Beginn			Ende Rob.bewegung		
	Rob	Hub	Prs	Rob	Prs	Afb
1.	150,240	o r o -		270,360	m - m r	
2.	180,270		u b u -	270,360		- b
3.	270,360	r		150,240		
4.	270,360		b,r	180,270		

Die obere Zeile zu jeder Phase enthält ihre Vorbedingungen, die untere ihre Resultate. Die Position des Roboters wird durch die Winkel seiner beiden Arme angegeben (vgl. Abb. 2).

Abkürzungen:

- o obere Position
- m mittlere Position
- u untere Position
- b bearbeitetes Metallplättchen
- r unbearbeitetes Metallplättchen
- leer

Fig. 13. Bewegungsphasen des Roboters (schematisch)

Abbildung 13 zeigt die Bewegungsphasen des Roboters schematisch. Man sieht, daß die Voraussetzungen für die Phasen 1. und 2. bzw. 3. und 4. jeweils einzeln oder für gemeinsam erfüllt sein können. Die Steuerung muß sicherstellen, daß Vor- und Rücklaufphasen des Roboters nie gleichzeitig ablaufen. Während des Ablaufs von Phase 4. (Rücklauf von Arm 2 zur Presse) kann der Fall eintreten, daß auf dem Hubdrehtisch ein neues unbearbeitetes Metallplättchen ankommt. In diesem Fall soll Phase 3. zugeschaltet werden, so daß der Roboter seinen Arm 1 zunächst bis zum Hubdrehtisch zurückfährt, dort das Metallplättchen aufnimmt (Phase 1.) und unterwegs Phase 2. zuschaltet, um die Presse durch Arm 2 zu leeren.

Der Grobentwurf der Steuerung teilt diese in Module für die einzelnen Bewegungsphasen auf. Sie lassen sich, wie in Abb. 14 gezeigt, informell beschreiben, die Ein- und Ausgabekanäle sind in Abb. 15 gezeigt.

1. Aufgabe: transportiere ein Metallplättchen vom Hubdrehtisch in die Presse
 Voraussetzungen: Roboterarm 1 in Position über dem Hubdrehtisch (150,240)
 Hubdrehtisch in oberer Position im richtigen Winkel
 unbearbeitetes Metallplättchen liegt auf dem Hubdrehtisch
2. Aufgabe: transportiere ein Metallplättchen von der Presse auf das Ablageförderband
 Voraussetzungen: Roboterarm 2 in Position in der Presse (180,270)
 Presse in unterer Position
 bearbeitetes Metallplättchen liegt in der Presse
3. Aufgabe: fahre Arm 1 zurück zum Hubdrehtisch
 Voraussetzungen: Roboterarm 1 in Position in der Presse (270,360)
 oder Phase 4 läuft bereits
 unbearbeitetes Metallplättchen liegt auf dem Hubdrehtisch
4. Aufgabe: fahre Arm 2 zurück zur Presse
 Voraussetzungen: Roboterarm 2 über dem Ablageförderband (270,360)
 Metallplättchen (bearbeitet oder unbearbeitet) in der Presse

Fig. 14. Bewegungsphasen des Roboters

Modul/Phase	1.	2.	3.	4.
Roboter Arm 1 Länge	*		*	
Roboter Arm 2 Länge		*		*
Roboter Winkel	*	*	*	*
Presse unten			*	*
Presse mitte	*		*	*
Ablageförderband frei		*		
Roboter Arm 1 ausfahren			*	
Roboter Arm 1 einfahren	*			
Roboter Arm 1 greifen	*			
Roboter Arm 2 ausfahren		*		
Roboter Arm 2 einfahren				*
Roboter Arm 2 greifen		*		
Roboter vor drehen	+	+		
Roboter zurück drehen			+	+

(Die mit “+” gekennzeichneten Ausgaben werden von mehreren Modulen beeinflusst.)

Fig. 15. Steuerungsmodule mit Ein- und Ausgabekanälen

Die Steuerung wird als TTL-ähnliche Digitalschaltung konzipiert. Es muß sichergestellt werden, daß Ablauf der Phase 1. durch einen eventuellen gleichzeitigen Ablauf der Phase 2. nicht gestört wird und umgekehrt; analog für die Phase 3. und 4.

Dazu wird die Spezifikation z.B. des Moduls für Phase 1. so ausgelegt, daß keine Voraussetzungen gemacht werden, die durch die gleichzeitige Aktivierung von Phase 2. ungültig werden. Es wird nur vorausgesetzt, daß in Phase 1. nicht gleichzeitig die Steuerung für das Zurückdrehen des Roboters oder für das Ausfahren seines ersten Armes aktiviert wird, was beides in Phase 2. nicht erfolgt. Dadurch können die von mehreren Modulen gemeinsam beeinflussten Ausgaben jeweils durch ein Oder-Gatter zusammengefaßt werden. Abbildung 16 zeigt die formale Spezifikation des Moduls für Phase 1. Die verwendeten Bezeichner sind in Anhang A informell erläutert und in Anhang B formal definiert.

$$\begin{aligned}
& \forall r, s_0, t_0, ci \exists t, co \ (\\
& \quad up(ci, t_0) \\
& \quad \wedge \text{ort}(s_0, t_0) = d_3 \\
& \quad \wedge \text{pos}_1(r, t_0) = d_3 \\
& \quad \wedge \text{winkel}(s_0, t_0) = \text{winkel_xy}(d_4, d_3) - 90 \\
& \quad \wedge \text{dist_xy}(d_4, d_5) \leq \text{dist_xy}(d_4, \text{pos}_1(r, t_0)) \\
& \quad \wedge \text{minlg}_1 \leq \text{dist_xy}(d_4, d_5) \\
& \quad \wedge \text{winkel_xy}(d_4, d_5) \leq 270 \\
& \quad \wedge \text{winkel_xy}(d_4, \text{pos}_1(r, t_0)) \leq \text{winkel_xy}(d_4, d_5) \\
& \quad \wedge \forall t_1, r \ (t_0 \leq t_1 \leq \text{trv}_1(r, 270, t_0) \rightarrow \neg \text{val}(cfa_1, t_1) = 1 \wedge \neg \text{val}(cfe_1, t_1) = 1 \wedge \\
& \quad \quad \quad \neg \text{val}(cdrv, t_1) = 1 \wedge \neg \text{val}(cgr_1, t_1) = 1) \\
& \quad \wedge \text{roboter}(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), d_4) \\
& \quad \rightarrow \text{proj_xy}(\text{pos}_1(r, t)) = \text{proj_xy}(d_5) \\
& \quad \wedge \text{ort}(s_0, t) = \text{pos}_1(r, t) \\
& \quad \wedge \text{winkel}(s_0, t) = 180 \\
& \quad \wedge up(co, t)
\end{aligned}$$

Fig. 16. Formale Spezifikation des Moduls für Phase 1

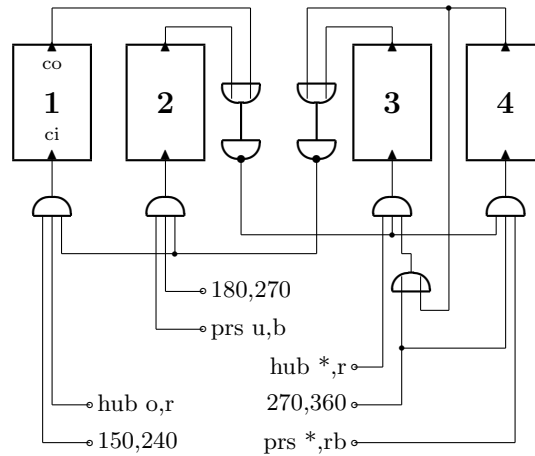
Die Steuerungsschaltung enthält Schleifen (Rückkoppelungen), kann also nicht als geschlossener endlicher Term dargestellt werden. Die Programmsynthese beruht jedoch wesentlich auf Unifikation, also dem Lösen von Gleichungen in der freien Algebra der (endlichen) Terme. Daher ist es nicht möglich, die Schaltung durch Synthese zu konstruieren, sondern sie muß im Vorhinein — durch ein Gleichungssystem, das einen unendlichen Term als Lösung hat — angegeben und dann verifiziert werden.

Abbildung 17 zeigt die Steuerungsschaltung des Roboters unter Verwendung von Modulen für die Phasen 1. bis 4. Die in Abb. 15 aufgeführten Ein- und Ausgabekanäle, die in direkter Verbindung mit Sensoren bzw. Motorsteuerungen stehen, sind dabei weggelassen. Es wird außerdem angenommen, daß folgende Signale bereits zur Verfügung stehen (vgl. Abb. 2):

- (150, 240) liefert den Wert 1 genau dann, wenn sich Roboterarm 1 über dem Hubdrehtisch befindet.
- (180, 270) liefert den Wert 1 genau dann, wenn sich Roboterarm 2 in der Presse befindet.
- (270, 360) liefert den Wert 1 genau dann, wenn sich Roboterarm 1 in der Presse und Arm 2 über dem Ablageförderband befindet.
- (*prs u, b*) liefert den Wert 1 genau dann, wenn sich die Presse in unterer Position befindet und ein bearbeitetes Metallplättchen enthält.

- $(prs *, rb)$ liefert den Wert 1 genau dann, wenn die Presse ein bearbeitetes oder unbearbeitetes Metallplättchen enthält.
- $(hub o, r)$ liefert den Wert 1 genau dann, wenn sich der Hubdrehtisch in oberer Position und im richtigen Winkel zur Entladung durch Roboterarm 1 befindet und ein unbearbeitetes Metallplättchen darauf liegt.
- $(hub *, r)$ liefert den Wert 1 genau dann, wenn ein unbearbeitetes Metallplättchen auf dem Hubdrehtisch liegt.

Diese Signale sind leicht aus den Sensoren und den Steuerungsmodulen für die anderen Maschinen zu gewinnen, die Vorgehensweise dazu wird anhand der Synthese der Schaltung für Modul 1. deutlich.



Termdarstellung der Schaltung:

```

c1 = modul1(and(rob_150_240, hub_o_r, neg(or(c3, c4))))
c2 = modul2(and(rob_180_270, prs_u_b, neg(or(c3, c4))))
c3 = modul3(and(or(rob_270_360, c4), hub_r, neg(or(c1, c2))))
c4 = modul4(and(rob_270_360, prs_rb, neg(or(c1, c2))))

```

Fig. 17. Steuerungsschaltung des Roboters

Bei der Synthese der Schaltungen für die Module 1. bis 4. wurden jeweils zunächst die notwendigen Zeitbedingungen für die Steuerung hergeleitet, danach wurde eine TTL-artigen Steuerschaltung konstruiert, die diese Zeitbedingungen erfüllt. Anhang C zeigt den Beweisbaum für den Hauptteil der Verifikation des Moduls 1 (Roboter transportiert ein Metallplättchen vom Hubdrehtisch in die Presse). Er entspricht im Wesentlichen der von SYSFOS erzeugten Ausgabe, wurde aber aus Lesbarkeitsgründen manuell nachbearbeitet (Umbruch von Formeln, Umbenennung von Variablen).

Jeder Knoten beginnt mit der Formelnummer, unmittelbar gefolgt von der Operation, aus der die Formel entstanden ist (siehe Abb. 4 für die verwendeten Abkürzungen). Für Axiome wurde dabei ihr eindeutiger Name angegeben; die Angabe “**” steht für eine bereits früher verwendete Formel. Schließlich folgt entweder “ F ”, “ $-$ ” für Assertions oder “ $-$ ”, “ F ” für Goals, wobei F die aktuelle Formel in PROLOG-Notation ist (siehe Abb. 18). Ein “\$” nach einem Namen deutet an, daß es sich um eine Skolemfunktion handelt, deren Argumente nicht angezeigt werden; ein “()” deutet an, daß die Argumente manuell entfernt wurden. Man beachte, daß Äquivalenzen vom System in Konjunktionen von Implikationen aufgelöst werden, um eindeutige Polaritäten zu erreichen.

Jede Formel ergibt sich aus der (bzw. den beiden) darüber liegenden um zwei Spalten nach rechts eingerückten Ausgangsformel(n), je nach Stelligkeit der angewendeten Operation. Weiter entfernte Ausgangsformeln werden durch senkrechte Striche verbunden.

Der Beweisbaum wird automatisch soweit als möglich linearisiert. Dazu werden in manchen Fällen die beiden Ausgangsformeln einer zweistelligen Operation vertauscht, was durch Großschreibung der entsprechenden Abkürzung angedeutet ist. Zum Beispiel ist die Formel 158 in Anhang C entstanden durch die Operation $rp(114, 157)$. Man beachte, daß an der Wurzel des Beweisbaums die noch offene Rest-Beweisverpflichtung steht (Formel 325).

=	=	(höchste Bindungsstärke)
=<	≤	
<	<	
~	¬	.
&	∧	.
!	∨	.
->	→	
<-	←	(niedrigste Bindungsstärke)

Fig. 18. PROLOG-Notation für Relationen und Junktoren

Die Argumente der Funktion r wurden aus Lesbarkeitsgründen fast überall von Hand entfernt. Ausnahmen bilden nur die Formeln 185, 203, 238, 276 und 325, die neben Formel 163 die Wurzeln der großen Teilbeweisbäume bilden. Abbildung 20 zeigt die Termdarstellung der Robotersteuerung für Modul 1, wie sie aus Formel 325 in Anhang C entnommen werden kann. Abbildung 19 zeigt die entsprechende Schaltung unter Verwendung der üblichen Symbole. Die Oder-Gatter mit dem Eingang cgr_1 bzw. cfe_1 wurden bereits weggelassen, da sie sich nach der Synthese aller vier Robotersteuerungs-Module als überflüssig herausstellen.

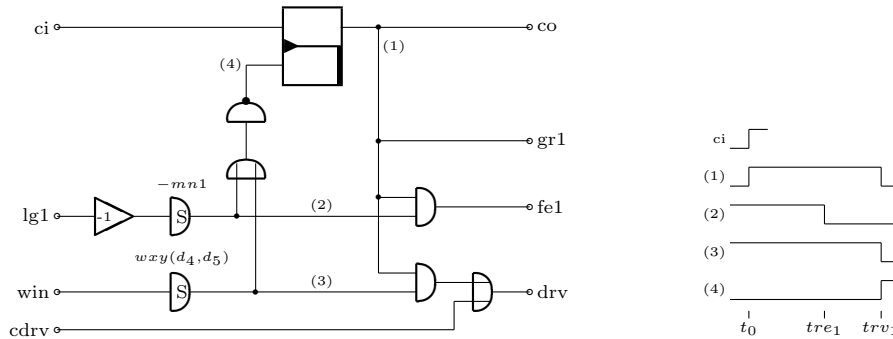


Fig. 19. Synthetisierte Schaltung für Modul 1

```

r(
/* Arm 1 ausfahren: */      cfa1,
/* Arm 1 einfahren: */     or(cfe1,
                             and(dff(ci,
                                 neg(or(trg(ampl(s22,
                                             -1
                                             ),
                                             dxy(d4,d5)*-1
                                             ),
                                             trg(s10,
                                                  wxy(d4,d5)
                                                  ) ) ) ),
                                 trg(ampl(s22,
                                             -1
                                             ),
                                             dxy(d4,d5)*-1
                                             ) ) ),
/* Arm 2 ausfahren: */      c31,
/* Arm 2 einfahren: */      c32,
/* Arm 1 greifen: */        or(cgr1,
                             dff(ci,
                                 neg(or(trg(ampl(s22,
                                             -1
                                             ),
                                             dxy(d4,d5)*-1
                                             ),
                                             trg(s10,
                                                  wxy(d4,d5)
                                                  ) ) ) ),
/* Arm 2 greifen: */        c34,
/* vordrehen: */            or(cdrv,
                             and(dff(ci,
                                 neg(or(trg(ampl(s22,
                                             -1
                                             ),
                                             dxy(d4,d5)*-1
                                             ),
                                             trg(s10,
                                                  wxy(d4,d5)
                                                  ) ) ) ),
                                 trg(s10,
                                     wxy(d4,d5)
                                     ) ) ),
/* zurueckdrehen: */        c36,
/* Laenge Arm 1: */         s22,
/* Laenge Arm 2: */         s23,
/* Winkel Arm 1: */         s10
)

```

Fig. 20. Termdarstellung der Robotersteuerung für Modul 1

6 Verwendung höherer logischer Operatoren

Ein zweiter Ansatz verwendete die bisher gemachten Erfahrungen und identifizierte höhere Sprachkonzepte, die es erlaubten, sowohl die Spezifikation als auch den Verifikationsbeweis auf eine höhere Ausdrucksebene zu heben. Es wurden zwei neue dreistellige logische Operatoren definiert, indem sie auf eine eingeschränkte Form der Prädikatenlogik zweiter Ordnung zurückgeführt wurden, siehe Abb. 21.

$$\begin{aligned} unt(t_0, P, Q) &\Leftrightarrow \forall t_1 : t_1 < t_0 \vee (\exists t : t_0 \leq t \leq t_1 \wedge Q(t)) \vee P(t_1) \\ ldt(t_0, P, Q) &\Leftrightarrow \exists t_1 : t_0 \leq t_1 \wedge (\forall t : (t_0 \leq t \leq t_1 \rightarrow P(t)) \rightarrow Q(t_1)) \\ &\quad \wedge (\forall t : t_0 \leq t \leq t_1 \rightarrow \neg Q(t)) \end{aligned}$$

Fig. 21. Anwendungsspezifische logische Operatoren

Die Konzepte wurden von der Sprache *Unity* von Misra und Chandy [CM88] übernommen. Die Formel $unt(t_0, P, Q)$ besagt, daß ab dem Zeitpunkt t_0 das einstellige Prädikat Q solange wahr ist, bis das einstellige Prädikat P wahr wird, ggf. für immer (“ P until Q ”). Die Formel $ldt(t_0, P, Q)$ besagt, daß, wenn ab dem Zeitpunkt t_0 das Prädikat P nur lange genug gilt, Q irgendwann wahr wird, und daß es dafür einen frühesten Zeitpunkt t_1 gibt (“ P leads to Q ”).

$$\begin{aligned} \forall t_0 : unt(t_0, P, Q) &\Leftrightarrow \forall t : t_0 \leq t \wedge (\forall t_1 : t_0 \leq t_1 < t \rightarrow \neg Q(t_1)) \rightarrow P(t) \\ \forall t_0 : P(t_0) &\rightarrow unt(t_0, P, Q) \\ \forall t_0 : unt(t_0, P, Q) &\rightarrow P(t_0) \\ \forall t_0 : P(t_0) \vee Q(t_0) &\Leftrightarrow unt(t_0, P, Q) \vee unt(t_0, Q, P) \\ \forall t_0 : unt(t_0, P, \neg P) & \\ \forall t_0 : unt(t_0, P, Q) \vee unt(t_0, \neg Q, \neg P) & \\ \forall t_0 : unt(t_0, P, Q \vee R) &\Leftrightarrow unt(t_0, P, Q) \vee unt(t_0, P, R) \\ \forall t_0 : unt(t_0, P, false) &\Leftrightarrow \forall t : (t_0 \leq t \rightarrow P(t)) \\ \forall t_0 : unt(t_0, P, Q) \wedge unt(t_0, R, S) &\rightarrow unt(t_0, P \vee R, Q \wedge S) \\ \forall t_0 : unt(t_0, P, Q) \wedge unt(t_0, R, S) &\rightarrow unt(t_0, P \wedge R, Q \vee S) \\ \forall t_0 : unt(t_0, P, Q) \wedge unt(t_0, R, \neg P) &\rightarrow unt(t_0, P \wedge R, Q) \\ \forall t_0 : unt(t_0, true, Q) & \\ \forall t_0 : unt(t_0, false, Q) &\Leftrightarrow (\forall t : t_0 \leq t \rightarrow \exists t_1 : t_0 \leq t_1 < t \wedge Q(t_1)) \\ \forall t_0 : (Q \rightarrow \neg R) &\rightarrow (ldt(t_0, P \wedge R, Q) \Leftrightarrow ldt(t_0, P, Q)) \\ \forall t_0 : t_0 \leq t_2 \wedge Q(t_2) &\rightarrow ldt(t_0, true, Q) \\ \forall t_0 : ldt(t_0, P, Q) \wedge (\forall t : R(t)) &\rightarrow ldt(t_0, P, Q \wedge R) \\ \forall t_0 : ldt(t_0, true, P) &\Leftrightarrow \forall t_0 : \exists t_1 : t_0 \leq t_1 \wedge P(t_1) \\ \forall t_0 : ldt(t_0, \neg P, P) &\rightarrow \exists t : t_0 \leq t \wedge P(t) \\ \forall t_0 : ldt(t_0, P, Q) \wedge unt(t_0, \neg R, Q) &\rightarrow ldt(t_0, P, Q \vee R) \\ \forall t_0 : ldt(t_0, P \wedge Q, R) \wedge unt(t_0, P, R) &\rightarrow ldt(t_0, Q, R) \\ \forall t_0 : unt(t_0, P, Q) \wedge t_0 \leq t_1 \wedge \neg P(t_1) &\rightarrow ldt(t_0, P, Q) \end{aligned}$$

Fig. 22. Hintergrundtheorie zu unt und ldt

Es wurde eine Hintergrundtheorie mit nützlichen Eigenschaften von unt und ldt bewiesen, einschließlich der Monotonie von unt im zweiten und dritten und von ldt im dritten Argument, sowie der Anti-Monotonie von ldt im zweiten Argument, so daß sich beide Operatoren problemlos in die in Abschnitt 3.1 erläuterte polaritätsbasierte Nicht-Klausel-Resolution einbeziehen lassen. Abbil-

dung 22 zeigt die wichtigsten Axiome der Hintergrundtheorie, dabei sind P , Q , R und S Variablen für einstellige Prädikate.

$$\begin{aligned}
\mathbf{u20'}: \quad & \forall r, x, t, d : \text{robot}(r, x) \\
& \quad \wedge \text{dist_xy}(x, \text{pos1}(r, t)) \leq d \leq \text{maxlg}_1 \\
& \quad \rightarrow \text{ldt}(t, \lambda t_1 : \text{faehrt_aus1}(r, t_1), \\
& \quad \quad \lambda t_2 : \text{dist_xy}(x, \text{pos1}(r, t_2)) \geq d) \\
\mathbf{61}: \quad & \text{ldt}(t_0, \neg P, P) \rightarrow \exists t \ t_0 \leq t \wedge P(t) \\
\mathbf{71} = \mathbf{u20'} \text{ rs } \mathbf{Vor} , \mathbf{r11} , \mathbf{u47b}: \quad & \\
& \text{ldt}(t_0, \lambda t_1 : \text{faehrt_aus1}(r, t_1), \\
& \quad \lambda t_2 : \text{dist_xy}(x, \text{pos1}(r, t_2)) \geq d_{34}) \\
\mathbf{72} = \mathbf{u30} \text{ rs } \mathbf{u73}: \quad & \text{dist_xy}(x, \text{pos1}(r_0, t)) < d_{34} \rightarrow \text{faehrt_aus1}(r_0, t_1) \\
& \text{mit } r_0 = r(\text{trigger}(s_1, d_{34}), c_2, c_3, \dots, s_3) \text{ wie in Abb. 10} \\
\mathbf{73} = \mathbf{71} \text{ rs } \mathbf{72}: \quad & \text{ldt}(t_0, \lambda t_1 : \text{dist_xy}(x, \text{pos1}(r_0, t_1)) < d_{34}, \\
& \quad \lambda t_2 : \text{dist_xy}(x, \text{pos1}(r, t_2)) \geq d_{34}) \\
\mathbf{74} = \mathbf{73} \text{ rs } \mathbf{61}: \quad & \exists t_2 : \text{dist_xy}(x, \text{pos1}(r, t_2)) \geq d_{34}
\end{aligned}$$

Fig. 23. Synthesebeweis der Schaltung aus Abb. 11 unter Verwendung höherer logischer Operatoren

Da die Operatoren *unt* und *ldt* häufig vorkommenden Mustern in der Spezifikation und im Beweis entsprechen, konnten beide durch ihre Verwendung kürzer und leichter verständlich gestaltet werden. Abbildung 23 zeigt das Analogon zum Beweis in Abb. 10 unter der Verwendung von *ldt*. Ein Axiom (61) aus der Hintergrundtheorie über *unt* und *ldt* wurde verwendet.

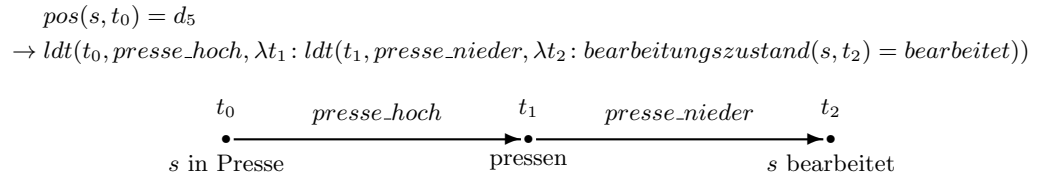


Fig. 24. Modellierung von Zustandsübergängen durch *ldt*-Ketten

Man beachte, daß Ketten von *ldts* Zustandsübergänge wie bei endlichen Automaten modellieren können, Abb. 24 zeigt ein Beispiel. Innerhalb des BMFT-Projekts “Korrekte Software (KORSO)” wurde die Fertigungszelle u.a. mit Hilfe der Sprache LUSTRE als eine Art endlicher Automat modelliert, so daß die wichtigsten Anforderungen vollautomatisch mit Hilfe von Binary Decision Diagrams verifiziert werden konnten [Hol95]. Ein solcher Ansatz kann jedoch nur Aspekte behandeln, die sich als Automateneigenschaften darstellen lassen. Es wäre interessant zu untersuchen, ob sich durch den *unt/ldt*-Ansatz eine vertikale Dekomposition des Modells erreichen läßt in dem Sinne, daß auf der oberen Ebene nur Automateneigenschaften betrachtet werden müssen, während alle anderen Eigenschaften auf der unteren Ebene behandelt werden.

7 Bewertung

7.1 Modellierbare Eigenschaften

Der hier vorgestellte Ansatz macht es leicht, alle verlangten Lebendigkeits- und Sicherheitseigenschaften zu formulieren und nachzuweisen. Die Lebendigkeitseigenschaft besagt, daß jedes unbearbeitete Metallplättchen, das in die Fertigungszelle hineingegeben wird, sie irgendwann im bearbeiteten Zustand wieder verläßt; siehe die Diskussion am Ende des Abschnitts 4.1. Die Sicherheitseigenschaften können in der zusätzlichen Anforderung “Es darf nie zu Unfällen kommen” zusammengefaßt werden, wobei eine notwendige Bedingung für einen Unfall durch eine entsprechende Aufzählung aller kritischen Maschinenkombinationen (z.B. Roboter/Presse) beschrieben wird.

Ein Nachteil dieses Vorgehens besteht in dem Risiko, beim Schreiben der Spezifikation bestimmte mögliche Konfliktsituationen zu übersehen. So war z.B. in der ersten Version der informellen Beschreibung der Sicherheitsanforderungen nicht verlangt, daß das Zufuhrförderband nur dann Metallplättchen transportieren darf, wenn der Hubdrehtisch leer ist.

Jede der informellen Sicherheitsanforderungen aus Abschnitt 2.3 ergibt sich aus einem der folgenden Prinzipien:

- Maschinenkollisionen müssen vermieden werden (1, 2, 5, 6),
- die Beweglichkeitsbeschränkungen der Maschinen müssen respektiert werden (3, 4, 5),
- Metallplättchen dürfen nicht aus großer Höhe herabfallen (7, 9),
- die Metallplättchen müssen genügend gut separiert bleiben (8, 10).

Es ist grundsätzlich möglich, die Sicherheitsanforderungen an die Fertigungszelle auf diese vier Prinzipien zu gründen. Eine Formalisierung des ersten Prinzips verlangt jedoch eine vollständige Beschreibung aller Maschinenabmessungen einschließlich ihrer Bewegungsbahnen und darüber hinaus für jedes der $n \cdot (n - 1)$ Maschinenpaare einen Beweis, daß sie nicht zusammenstoßen können, unabhängig davon, wie weit sie tatsächlich voneinander entfernt stehen. Da beides sehr aufwendig ist, haben wir uns stattdessen dazu entschlossen, die möglichen Kollisionssituationen explizit anzugeben.

7.2 Explizitheitsgrad

Die Voraussetzungen über das Maschinenverhalten und über die Gesamtkonfiguration der Fertigungszelle sind in den entsprechenden Modulen der Spezifikation explizit aufgeführt. Darüber hinaus ist es möglich, während des Beweises weitere benötigte Anforderungen an Verhalten oder Konfiguration abzuleiten, siehe Abschnitt 4.2.

7.3 Statistik

Es ist schwierig, den Zeitaufwand für die Durchführung des Beweises abzuschätzen, da parallel dazu das Unterstützungswerkzeug SYSYFOS weiterentwickelt werden mußte, um den Beweis überhaupt in den Griff zu bekommen. Als Nebenergebnis der Fallstudie wurde eine halbgraphische Benutzeroberfläche und ein Beweiswiederholungs-Mechanismus in das Werkzeug eingebaut; in der zweiten Phase erforderte die eingeschränkte Unifikation höherer Ordnung für *unt* und *ldt* einige Implementierungsarbeit. Unter diesen Vorbehalten kann der Aufwand für das Finden bzw. Verifizieren der Teilschaltung zum Transport eines Metallplättchens vom Hubdrehtisch in die Presse mit etwa 1 bis 2 Mannwochen angegeben werden. Dieser Teilbeweis besteht aus 210 Schritten ohne die Verwendung von *unt* und *ldt* und war der erste Teilbeweis innerhalb der Fallstudie. Ein später durchgeführter vergleichbar großer Teilbeweis benötigte größenordnungsmäßig nur noch 1 bis 2 Manntage, hauptsächlich aufgrund der vorhandenen Erfahrungen speziell bzgl. der in Abschnitt 4.3 diskutierten Stetigkeitsaspekte.

7.4 Wartung

Der Hauptaufwand für die Entwicklung einer Steuerung für eine geänderte, vergleichbare Fertigungszelle besteht im Führen eines neuen Beweises. Aufbauend auf der vorhandenen Terminologie sollte es leicht fallen, eine neue formale Spezifikation zu erstellen. Sofern der auf reiner Prädikatenlogik erster Ordnung basierende Ansatz verwendet wird, dürften nur wenige Teile des Originalbeweises wiederverwendbar sein, je nach dem Grad der Ähnlichkeit der beiden Spezifikationen. Im *unt/ldt*-Ansatz jedoch wurde ein großer Teil des Aufwandes in die Schematisierung von Steuerungswissen als Hintergrundtheoreme gesteckt, der beim zweiten Mal nicht wieder anfällt; siehe etwa Satz 61 in Abb. 23, der dort die zentrale Rolle im Beweis spielt. Wir würden erwarten, daß der verbleibende Beweisaufwand, um die Hintergrundtheoreme für die neue Situation geeignet zu instanziiieren, eher gering ist. In jedem Fall ist jedoch der Aufwand, eine neue verifizierte Steuerungsschaltung zu erhalten, sehr viel größer als etwa der für die Rekonfiguration eines objektorientierten Steuerungsprogramms.

7.5 Effizienz

Das Paradigma der deduktiven Programmsynthese macht keine Aussagen über die Effizienz der konstruierten Programme. Darüber hinaus bedeutet Effizienz im Fall der Fertigungszelle nicht, kurze Software-Reaktionszeiten zu erreichen, sondern eine hohe Gesamtdurchsatzrate. Gemäß dem Ansatz, Software-Entwicklungsmethoden auch auf die Anwendung auf mechanische Probleme auszuweiten, könnte man die "algorithmische Komplexität" der gesamten Fertigungszelle abschätzen. Dazu wäre eine entsprechende Verallgemeinerung eines Komplexitätskalküls für reaktive Systeme notwendig. Da in der Fertigungszelle keine Rekursion auftritt, könnte die maximale Bearbeitungszeit für ein Metallplättchen exakt berechnet werden. Etwa aus dem Teilbeweis in Anhang C ergibt sich die Zeit zum Zurückfahren des ersten Roboterarms von der Presse zum Hubdrehtisch als $trv_1(r(\dots), \text{winkel_xy}(d_4, d_5), t_0) - t_0$, vgl. Formel 325. Ein Beweis dafür, daß die gefundene Konfiguration und Steuerung der Zelle einen *maximalen* Durchsatz garantiert, scheint jedoch ebenso schwierig wie der Nachweis unterer Komplexitätsschranken für gewöhnliche algorithmische Probleme.

7.6 Mechanische Anforderungen

Wie bereits in Abschnitt 4.2 erwähnt, wurden während der Synthese eine Reihe zusätzlicher Anforderungen an die Konfiguration der Fertigungszelle hergeleitet. Sie verlangen meist, daß die Beweglichkeitsbeschränkungen der Maschinen es ihnen erlauben, die benötigten Punkte tatsächlich zu erreichen, etwa, daß der erste Roboterarm den Hubdrehtisch erreichen kann, vgl. Axiom *u22* in Anhang B. Eine zweite Gruppe von Anforderungen betrifft die Kompatibilität von Abmessungen und Winkeln, etwa, daß die obere Position des Hubdrehtisches, der erste Roboterarm und die mittlere Position der Presse alle in derselben Höhe liegen müssen, vgl. Axiome *u15* und *u46*.

Einige weitere Bedingungen sind nicht unbedingt notwendig, führen aber zu einer vereinfachten Steuerungsschaltung. Wenn z.B. bekannt ist, daß der Abstand vom Drehzentrum des Roboters zum Hubdrehtisch größer ist als zur Presse, so genügt es, den ersten Arm auf dem Weg zur Presse einzufahren, während sonst die Schaltung zusätzlich die Möglichkeit des Ausfahrens vorsehen müßte; vgl. auch Axiom *r6* in Anhang B.

Wenn die Fertigungszelle offen, d.h. ohne das Handhabungsgerät, betrieben wird, fallen weitere Anforderungen über das Be- und Entladeverhalten an. Zum Beispiel darf das Zuführband nur beladen werden, wenn an seinem Anfang genügend Platz dafür frei ist. Diese Bedingung macht einen zusätzlichen Sensor notwendig, entweder am Anfang des Zuführbandes oder — was zu einer einfacheren und robusteren Steuerung führt — an dessen Ende.

Unsere Modellierung basiert auf der idealisierenden Annahme, daß alle geometrischen Abmessungen exakt sind. In der Praxis wird dies jedoch nicht der Fall sein, etwa das Zuführband wird nicht jedes Metallplättchen genau bis zur Mitte des Hubdrehtischs (Punkt d_3 in Abb. 2) transportieren. Ein Modell der Fertigungszelle, das diesen Ungenauigkeiten Rechnung trägt, müsste mit zulässigen Toleranzintervallen umgehen können. So würde man z.B. in der Spezifikation fordern, daß der Roboter jedes Metallplättchen, das im Bereich $d_3 + x$ mit $\|x\| < \varepsilon_3$ liegt, noch sicher aufnimmt und zur Presse transportiert. Jede Maschine würde ihre eigene Ungenauigkeit zum Toleranzintervall hinzufügen, in manchen Fällen dieses Intervall aber auch durch gewisse Ausrichtungseffekte wieder verkleinern, etwa bei Lichtschranken. Es müßte dann zusätzlich verlangt werden, daß die Toleranzintervalle klein genug bleiben, um die problemlose Weiterverarbeitung zu ermöglichen. Das Toleranzintervall eines Metallplättchens in der Presse zum Beispiel enthält die Toleranzen des ersten Roboterarms, des Hubdrehtischs, des Zuführförderbands und dessen (externen) Beladungsgeräts, es muß sichergestellt sein, daß diese Abweichung klein genug bleibt, um das Metallplättchen zuverlässig pressen zu können.

7.7 Thesen

Unsere Erfahrungen mit der Fertigungszelle scheinen folgende Thesen zu bestätigen:

- *Eine gute Spezifikation sollte aus einer Sammlung beinahe offensichtlicher Fakten in formaler Notation bestehen.*

Der Verzicht auf Ausführbarkeit garantiert die Freiheit, die formalen Anforderungen als eine möglichst direkte Übersetzung der natürlichsprachlichen Beschreibung aufzustellen. Erstere können lokal (d.h. Axiom für Axiom, ohne Berücksichtigung von Querverweisen) gegen letztere validiert werden.

- *Module der Anforderungsspezifikation beschreiben verschiedene Aspekte der modellierten Realität, nicht der Implementierung.*

Im Unterschied zu Entwurfsspezifikationen können sie nicht in Implementierungsmodule verfeinert werden, stattdessen sind sie zu ihnen orthogonal.

- *Prädikatenlogik kann als eine „Assemblersprache“ für Spezifikationen angesehen werden.*

Es ist wünschenswert, höhere, auch anwendungsabhängige, Sprachkonstrukte darauf aufzubauen, um kürzere Spezifikationen und Beweise zu erhalten.

- *Formale Beschreibungen können bereits auf der obersten Ebene eingesetzt werden, auf der nur rein technische Aspekte auftreten.*

Es scheint keinen Grund zu geben, sie erst ab der Ebene der Software-Entwicklung einzusetzen, logik-basierte Methoden können im Gegenteil als ein Integrationsrahmen für eine verifizierte Entwicklung des Gesamtsystems, einschließlich klassischer Mechanik, dienen. Dies wurde durch unsere Behandlung der Fallstudie Fertigungszelle demonstriert, die gänzlich im rein technischen Bereich liegt und deren Spezifikation das Hauptziel (Fertigung bearbeiteter Metallplättchen) beinhaltet. Wenn das Hauptziel andererseits nichttechnischer Natur ist, wie z.B. in einem medizinischen Informationssystem, ist dieser Ansatz nicht voll anwendbar.

- *Es gibt nur wenige adäquate Beschreibungsebenen.*

Unsere Erfahrung hat gezeigt, daß die Entscheidung, die Zeit nicht-diskret zu modellieren, notwendigerweise eine auf reellwertiger Zeit und stetigen Funktionen basierende Modellierung zur Folge hat, dazwischen scheint es keine adäquate Ebene mehr zu geben (etwa rationalwertige Zeit und beliebige Funktionen). Ein realistischeres Vorgehen wäre die Benutzung differenzierbarer Funktionen, um Aussagen über Beschleunigungen und Startgeschwindigkeiten machen zu können. Während eine solche Beschreibungsebene für die Fertigungszelle nicht

unbedingt notwendig war, ist sie für zeitkritische Anwendungen unvermeidbar, etwa im Bereich von Fahrzeugsteuerungssystemen, wo Aussagen über Beschleunigungs- und Bremszeiten lebenswichtig sind.

References

- [Ble77] W. W. Bledsoe. Non-resolution theorem proving. *Artif. Intell. J.*, 9:1–35, 1977.
- [Bur89] Jochen Burghardt. Deduktive Programmsynthese. In *Workshop on Verification, Construction and Synthesis of Programs*, number 10/89 in Interner Bericht, April 1989.
- [Bur95] Jochen Burghardt. Deductive synthesis applied to the case study production cell. In T. Lindner and C. Lewerentz, editors, *Formal development of reactive systems — Case study production cell*, volume 891 of *LNCS*, pages 297–311. Springer, 1995.
- [CM88] J. Chandy and J. Misra. *Parallel Program Design, A Foundation*. Addison-Wesley, 1988.
- [Haa92] Oliver Haase. Nicht-Klausel-Resolution bei der deduktiven Programmsynthese. Master’s thesis, University Karlsruhe, 1992.
- [Hol95] Leszek Holenderski. A verified production cell controller specified in LUSTRE. In T. Lindner and C. Lewerentz, editors, *Formal development of reactive systems — Case study production cell*, volume 891 of *LNCS*, pages 101–112. Springer, 1995.
- [Knu84] D. Knuth. Literate programming. *The Computer Journal*, 27(2):97–111, May 1984.
- [LL95] Claus Lewerentz and Thomas Lindner, editors. *Formal Development of Reactive Systems — Case Study Production Cell*, volume 891 of *LNCS*. Springer, Heidelberg, 1995.
- [Moh91] Ursula Mohaupt. Deduktive Programmsynthese. Master’s thesis, Technical University Berlin, 1991.
- [Mur78] N. Murray. A proof procedure for non-clausal first-order logic. Technical report, Syracuse Univ., Syracuse, N.Y., 1978.
- [Mur82] N. V. Murray. Completely non-clausal theorem proving. *Artificial Intelligence*, 18:67–85, 1982.
- [MW80] Zohar Manna and Richard Waldinger. A deductive approach to program synthesis. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 2:90–121, Jan 1980.
- [MW86] Zohar Manna and Richard Waldinger. Special relations in automated deduction. *Journal of the ACM*, pages 1–59, Jan 1986.
- [Rob65] J.A. Robinson. A machine-oriented logic based on the resolution principle. *Journal of the ACM*, 23(12), 1965.
- [Sch88] U.R. Schmerl. Resolution on formula-trees. *Acta Informatica*, 25:425–438, 1988.
- [St60] K. Schtte. *Beweistheorie*. Springer, Berlin, 1960.
- [Tra86a] J. Traugott. Nested resolution. In *Proc. 8th Conf. on Autom. Deduct.*, volume 230 of *LNCS*. Springer, 1986.
- [Tra86b] Jonathan Traugott. Deductive synthesis of sorting programs. In *Proceedings of the International Conference on Automated Deduction*, volume 230 of *LNCS*, pages 641–660. Springer, 1986.
- [Wil73] D. Wilkins. QUEST — a non-clausal theorem proving system. Master’s thesis, Univ. of Essex, England, 1973.

Anhang

Anhang A zeigt die informelle Beschreibung der in der Spezifikation der Fertigungszelle verwendeten Bezeichner. Abbildung 25 zeigt die Variablenkonventionen, Abb. 26 die Prädikate, Abb. 27 die Funktionen, Abb. 28 die Konstanten und Abb. 29 die expliziten Skolemfunktionen. In der rechten Spalte sind jeweils die in Anhang C verwendeten Kurzbezeichner aufgeführt.

Anhang B zeigt die formale Anforderungsspezifikation der Fertigungszelle unter Verwendung der in Anhang A definierten Sprachebene (Axiome *u1* bis *u77*). Die Axiome für Sicherheitsanforderungen sind weggelassen. Der Text wurde aus einer WEB-artigen Darstellung [Knu84] gewonnen, die sich andererseits auch direkt in die PROLOG-Eingabe für SYSYFOS transformieren läßt. Im Anschluß daran sind die für die Synthese von Modul 1 benötigten Axiome und das Beweisziel aufgeführt (Axiome *r1* bis *r11*, Beweisziel *r20*).

Anhang C zeigt den Beweisbaum für den Hauptteil der Verifikation des Moduls 1 aus Abschnitt 5.

A Informelle Beschreibung der verwendeten Bezeichner

p : Presse
 x : Raumkoordinaten
 t : Zeitpunkt
 s : Schiene (Metallplättchen)
 r : Zweiarmiger Roboter
 h : Hubdrehtisch
 f : Förderband
 α : Winkel

Fig. 25. Informelle Beschreibung der verwendeten Variablenkonventionen

$presse(p, x)$	\Leftrightarrow	p ist eine Presse und steht am Ort x	prs
$roboter(r, x)$	\Leftrightarrow	r ist ein zweiarmiger Roboter und steht am Ort x	rob
$greift1(r, t)$	\Leftrightarrow	Der erste Arm des Roboters r greift zum Zeitpunkt t (d.h. Magnet ein)	$gr1$
$greift2(r, t)$	\Leftrightarrow	Der zweite Arm des Roboters r greift zum Zeitpunkt t	$gr2$
$haelt1(r, s, t)$	\Leftrightarrow	Der erste Arm des Roboters r hält zum Zeitpunkt t die Schiene s fest (d.h. magnetisch angezogen)	$ha1$
$haelt2(r, s, t)$	\Leftrightarrow	Der zweite Arm von r hält zum Zeitpunkt t die Schiene s fest	$ha2$
$dreht_zurueck(r, t)$	\Leftrightarrow	Der Roboter r dreht sich zum Zeitpunkt t gegen den mathematischen Drehsinn (d.h. im Uhrzeigersinn)	drz
$dreht_vor(r, t)$	\Leftrightarrow	Der Roboter r dreht sich zum Zeitpunkt t im mathematischen Drehsinn (d.h. gegen den Uhrzeigersinn)	drv
$faehrt_aus1(r, t)$	\Leftrightarrow	Der Roboter r fährt zur Zeit t seinen ersten Arm nach außen	$fa1$
$faehrt_ein1(r, t)$	\Leftrightarrow	Der Roboter r fährt zur Zeit t seinen ersten Arm nach innen	$fe1$
$faehrt_aus2(r, t)$	\Leftrightarrow	Der Roboter r fährt zur Zeit t seinen zweiten Arm nach außen	$fa2$
$faehrt_ein2(r, t)$	\Leftrightarrow	Der Roboter r fährt zur Zeit t seinen zweiten Arm nach innen	$fe2$
$hubdrehtisch(h, x)$	\Leftrightarrow	h ist ein Hubdrehtisch und steht am Ort x	hub
$hebt(h, t)$	\Leftrightarrow	Der Hubdrehtisch h fährt zum Zeitpunkt t nach oben	hbt
$senkt(h, t)$	\Leftrightarrow	Der Hubdrehtisch h fährt zum Zeitpunkt t nach unten	snk
$dreht_vor(h, t)$	\Leftrightarrow	Der Hubdrehtisch h dreht sich zum Zeitpunkt t im mathematischen Drehsinn (d.h. gegen den Uhrzeigersinn)	drv
$dreht_zurueck(h, t)$	\Leftrightarrow	Der Hubdrehtisch h dreht sich zum Zeitpunkt t gegen den mathematischen Drehsinn (d.h. im Uhrzeigersinn)	drz
$foerderband(f, x1, x2)$	\Leftrightarrow	f ist ein Förderband und läuft vom Punkt $x1$ zum Punkt $x2$	for
$laeuft(f, t)$	\Leftrightarrow	Das Förderband ist zum Zeitpunkt t in Bewegung	lft
$handhabungsgeraet(h, x1, x2)$	\Leftrightarrow	h ist ein Handhabungsgerät und läuft zwischen $x1$ (links) und $x2$ (rechts)	han
$fabrik(f)$	\Leftrightarrow	f ist eine wie im Modellschema beschrieben konfigurierte Fabrik	fab
$bewegt(m, s, t)$	\Leftrightarrow	Maschine m bewegt zum Zeitpunkt t die Schiene s	bw
$up(c, t)$	\Leftrightarrow	Die zeitabhängige Funktion springt zum Zeitpunkt t auf 1 (steigende Flanke)	up

Fig. 26. Informelle Beschreibung der verwendeten Prädikate

$ort(s, t)$	=	Raumkoordinaten des Ortes, an dem sich die Schiene s zum Zeitpunkt t befindet	ort
$bearbeitungszustand(s, t)$	=	der Bearbeitungszustand der Schiene s zum Zeitpunkt t ($\in \{bearbeitet, unbearbeitet\}$)	btz
$pos1(r, t)$	=	Koordinaten des Greifers des ersten Arms des Roboters r zum Zeitpunkt t	$ps1$
$proj_{xy}(x)$	=	Projektion der Raumkoordinaten x auf die Bodenebene	pxy
$hoehe(x, t)$	=	Höhe der Arbeitsfläche über dem Boden am Punkt mit den Planarkoordinaten x zum Zeitpunkt t	hoe
$winkel_{xy}(x, x1)$	=	Winkel zwischen der Strecke $\langle x, x1 \rangle$ und der ausgezeichneten 0-Richtung ($x, x1$: Planarkoordinaten)	wxy
$winkel(h, t)$	=	Aktueller Winkel des Hubdrehtisches h zum Zeitpunkt t	win
$sensor1(h, t)$	=	Wert des unteren Sensors des Hubdrehtisches h zum Zeitpunkt t	$ss1$
$sensor2(h, t)$	=	Wert des oberen Sensors des Hubdrehtisches h zum Zeitpunkt t	$ss2$
$dist_{xy}(x, x1)$	=	Abstand der XY-Projektionen von x und $x1$	dxy
$winkel(s, t)$	=	Aktueller Winkel der Schiene s zum Zeitpunkt t	win
$val(c, t)$	=	Wert der zeitabhängigen Funktion c zum Zeitpunkt t	val
$trigger(c, v)$	=	liefert neue zeitabhängige Funktion, der Wert von $trigger(c, v)$ ist 1 gdw. der Wert von c ist kleiner als v	trg
$ampl(c, v)$	=	liefert neue zeitabhängige Funktion mit v -fach verstärktem Wert	amp
$neg(c)$	=	Inverter (liefert neue zeitabhängige Funktion)	neg
$and(c1, c2)$	=	Und-Gatter (liefert neue zeitabhängige Funktion)	and
$or(c1, c2)$	=	Oder-Gatter (liefert neue zeitabhängige Funktion)	or
$dff(c1, c2)$	=	D-Flip-Flop (liefert neue zeitabhängige Funktion)	dff
$mff(c, d)$	=	Zeitverzögerung um d Einheiten (liefert neue zeitabh. Funktion)	mff

Fig. 27. Informelle Beschreibung der verwendeten Funktionen

<i>bearbeitet</i>	=	möglicher Zustand eines Metallplättchens	<i>bbt</i>
<i>unbearbeitet</i>	=	möglicher Zustand eines Metallplättchens	<i>ubt</i>
d_1	=	Anfangspunkt des Zuführförderbands (kartesischer Koordinatenvektor)	d_1
d_2	=	Endpunkt des Zuführförderbands (kartesischer Koordinatenvektor)	d_2
d_3	=	Mittelpunkt des Hubdrehtischs (kartesischer Koordinatenvektor)	d_3
d_4	=	Drehzentrum des Roboters (kartesischer Koordinatenvektor)	d_4
d_5	=	Mittelpunkt der Presse (kartesischer Koordinatenvektor)	d_5
d_6	=	Anfangspunkt des Ablageförderbands (kartesischer Koordinatenvektor)	d_6
d_7	=	Endpunkt des Ablageförderbands (kartesischer Koordinatenvektor)	d_7
$maxlg_1$	=	maximale Länge von Roboterarm 1	mx_1
$maxlg_2$	=	maximale Länge von Roboterarm 2	mx_2
$minlg_1$	=	minimale Länge von Roboterarm 1	mn_1
$minlg_2$	=	minimale Länge von Roboterarm 2	mn_2
zh_oben	=	Höhe der oberen Position des Hubdrehtischs (z -Koordinate)	zho
zh_unten	=	Höhe der unteren Position des Hubdrehtischs (z -Koordinate)	zhu
zp_oben	=	Höhe der oberen Position der Presse (z -Koordinate)	zpo
zp_mitte	=	Höhe der mittleren Position der Presse (z -Koordinate)	zpm
zp_unten	=	Höhe der unteren Position der Presse (z -Koordinate)	zpu

(Für die Synthese von Modul 1 der Robotersteuerung:)

t_0	=	Startzeitpunkt von Phase 1	t_0
s_0	=	transportiertes Metallplättchen	s_0
ci	=	Eingangsstartsignal (zeitabhängige Funktion)	ci
$cdrv$	=	externes Steuerungssignal zum Vordrehen des Roboters (zeitabhängige Funktion)	$cdrv$
cfa_1	=	externes Steuerungssignal zum Ausfahren von Arm 1 (zeitabhängige Funktion)	cfa_1
cfe_1	=	externes Steuerungssignal zum Einfahren von Arm 1 (zeitabhängige Funktion)	cfe_1
cgr_1	=	externes Steuerungssignal zum Greifen von Arm 1 (zeitabhängige Funktion)	cgr_1

Fig. 28. Informelle Beschreibung der verwendeten Konstanten

$trv1(r, \alpha, t) =$	Zeitpunkt, zu dem sich der Roboter r so weit vor gedreht hat, daß Arm1 den Winkel α hat, wenn er sich seit Zeitpunkt t vor dreht	$trv1$
$trv2(r, \alpha, t) =$	Zeitpunkt, zu dem sich der Roboter r so weit vor gedreht hat, daß Arm2 den Winkel α hat, wenn er sich seit Zeitpunkt t vor dreht	$trv2$
$trz1(r, \alpha, t) =$	Zeitpunkt, zu dem sich der Roboter r so weit zurück gedreht hat, daß Arm1 den Winkel α hat, wenn er sich seit Zeitpunkt t zurück dreht	$trz1$
$trz2(r, \alpha, t) =$	Zeitpunkt, zu dem sich der Roboter r so weit zurück gedreht hat, daß Arm2 den Winkel α hat, wenn er sich seit Zeitpunkt t zurück dreht	$trz2$
$tra1(r, d, t) =$	Zeitpunkt, zu dem der Roboter r Arm1 bis zur Länge d ausgefahren hat, wenn er ihn seit Zeitpunkt t ausfährt	$tra1$
$tra2(r, d, t) =$	Zeitpunkt, zu dem der Roboter r Arm2 bis zur Länge d ausgefahren hat, wenn er ihn seit Zeitpunkt t ausfährt	$tra2$
$tre1(r, d, t) =$	Zeitpunkt, zu dem der Roboter r Arm1 bis zur Länge d eingefahren hat, wenn er ihn seit Zeitpunkt t einfährt	$tre1$
$tre2(r, d, t) =$	Zeitpunkt, zu dem der Roboter r Arm2 bis zur Länge d eingefahren hat, wenn er ihn seit Zeitpunkt t einfährt	$tre2$

Fig. 29. Informelle Beschreibung der verwendeten expliziten Skolemfunktionen

B Formale Spezifikation der Fertigungszelle

Presse

- u1.** Die Presse preßt in oberer Position eine in ihr liegende unbearbeitete Schiene

$$\begin{aligned}
 & \forall [p, x, s, t, t_2] (\\
 & \quad presse(p, x) \\
 & \quad \wedge bearbeitungszustand(s, t) = unbearbeitet \\
 & \quad \wedge proj_xy(ort(s, t)) = proj_xy(x) \\
 & \quad \wedge winkel(s, t) = 180 \\
 & \quad \wedge \exists [t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \wedge hoehe(proj_xy(x), t_1) = zp_oben) \\
 & \rightarrow bearbeitungszustand(s, t_2) = bearbeitet \\
 & \quad \wedge proj_xy(ort(s, t_2)) = proj_xy(x) \\
 & \quad \wedge winkel(s, t_2) = 180)
 \end{aligned}$$

- u2.** Wenn sich die Presse nur lange genug hebt, erreicht sie schließlich die obere Position

$$\begin{aligned}
 & \forall [t] \exists [t_2] \forall [p, x] (\\
 & \quad presse(p, x) \\
 & \rightarrow (\forall [t_1] (t \leq t_1 < t_2 \rightarrow hebt(p, t_1)) \rightarrow hoehe(proj_xy(x), t_2) = zp_oben) \\
 & \quad \wedge \forall [t_3] (t \leq t_3 < t_2 \rightarrow \neg hoehe(proj_xy(x), t_3) = zp_oben))
 \end{aligned}$$

- u3.** Wenn sich die Presse aus der unteren Position nur lange genug hebt, erreicht sie schließlich die mittlere Position

$$\begin{aligned}
 & \forall [t] \exists [t_2] \forall [p, x] (\\
 & \quad presse(p, x) \\
 & \quad \wedge hoehe(proj_xy(x), t) = zp_unten \\
 & \rightarrow (\forall [t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \rightarrow hebt(p, t_1)) \rightarrow hoehe(proj_xy(x), t_2) = zp_mitte) \\
 & \quad \wedge \forall [t_3] (t \leq t_3 < t_2 \rightarrow \neg hoehe(proj_xy(x), t_3) = zp_mitte))
 \end{aligned}$$

- u4.** Wenn sich die Presse nur lange genug senkt, erreicht sie schließlich die untere Position

$$\begin{aligned}
 & \forall [t] \exists [t_2] \forall [p, x] (\\
 & \quad presse(p, x) \\
 & \rightarrow (\forall [t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \rightarrow senkt(p, t_1)) \rightarrow hoehe(proj_xy(x), t_2) = zp_unten) \\
 & \quad \wedge \forall [t_3] (t \leq t_3 < t_2 \rightarrow \neg hoehe(proj_xy(x), t_3) = zp_unten))
 \end{aligned}$$

- u5.** $\forall [p, x, s, t] ($
 $\quad presse(p, x)$
 $\rightarrow (proj_xy(ort(s, t)) = proj_xy(x) \wedge (hebt(p, t) \vee senkt(p, t)) \leftrightarrow bewegt(p, s, t)))$

- u6.** Motorsteuerung und Sensoren

c_1 : +1 hebt, 0 steht

c_2 : +1 senkt, 0 steht

s_1 : +1 unten

s_2 : +1 mitte

s_3 : +1 oben

$$\begin{aligned}
 & \forall [c_1, c_2, s_1, s_2, s_3, x, t] (\\
 & \quad presse(p(c_1, c_2, s_1, s_2, s_3), x) \\
 & \rightarrow (hebt(p(c_1, c_2, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow val(c_1, t) = 1) \\
 & \quad \wedge (senkt(p(c_1, c_2, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow val(c_2, t) = 1) \\
 & \quad \wedge (hoehe(proj_xy(x), t) = zp_unten \leftrightarrow val(s_1, t) = 1) \\
 & \quad \wedge (hoehe(proj_xy(x), t) = zp_mitte \leftrightarrow val(s_2, t) = 1) \\
 & \quad \wedge (hoehe(proj_xy(x), t) = zp_oben \leftrightarrow val(s_3, t) = 1))
 \end{aligned}$$

Zweiarmiger Roboter

- u7.** Wenn der Roboter mit Arm 1 zugreift, hält er eine Schiene, die sich im richtigen Winkel unter Arm 1 befindet

$$\begin{aligned}
& \forall [r, x, t, s, x_1] (\\
& \quad \text{roboter}(r, x) \\
& \quad \wedge \text{pos}_1(r, t) = x_1 \\
& \quad \wedge \text{ort}(s, t) = x_1 \\
& \quad \wedge \text{winkel}(s, t) = \text{winkel_xy}(x, x_1) - 90 \\
& \quad \wedge \text{greift}_1(r, t) \\
& \rightarrow \text{haelt}_1(r, s, t))
\end{aligned}$$

- u8.** Wenn der Roboter mit Arm 2 zugreift, hält er eine Schiene, die sich im richtigen Winkel unter Arm 2 befindet

$$\begin{aligned}
& \forall [r, x, t, s, x_1] (\\
& \quad \text{roboter}(r, x) \\
& \quad \wedge \text{pos}_2(r, t) = x_1 \\
& \quad \wedge \text{ort}(s, t) = x_1 \\
& \quad \wedge \text{winkel}(s, t) = \text{winkel_xy}(x, x_1) - 90 \\
& \quad \wedge \text{greift}_2(r, t) \\
& \rightarrow \text{haelt}_2(r, s, t))
\end{aligned}$$

- u9.** Der Roboter hält eine einmal gegriffene Schiene mit Arm 1 fest, bis er sie wieder losläßt

$$\begin{aligned}
& \forall [r, x, s, t, t_2] (\\
& \quad \text{roboter}(r, x) \\
& \quad \wedge \text{haelt}_1(r, s, t) \\
& \quad \wedge \forall [t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \rightarrow \text{greift}_1(r, t_1)) \\
& \rightarrow \text{haelt}_1(r, s, t_2) \\
& \quad \wedge \text{bearbeitungszustand}(s, t_2) = \text{bearbeitungszustand}(s, t_0))
\end{aligned}$$

- u10.** Der Roboter hält eine einmal gegriffene Schiene mit Arm 2 fest, bis er sie wieder losläßt

$$\begin{aligned}
& \forall [r, x, s, t, t_2] (\\
& \quad \text{roboter}(r, x) \\
& \quad \wedge \text{haelt}_2(r, s, t) \\
& \quad \wedge \forall [t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \rightarrow \text{greift}_2(r, t_1)) \\
& \rightarrow \text{haelt}_2(r, s, t_2) \\
& \quad \wedge \text{bearbeitungszustand}(s, t_2) = \text{bearbeitungszustand}(s, t_0))
\end{aligned}$$

- u11.** Der Roboter bewegt eine gehaltene Schiene mit seinem Arm 1 mit

$$\begin{aligned}
& \forall [r, x, s, t] (\\
& \quad \text{roboter}(r, x) \\
& \quad \wedge \text{haelt}_1(r, s, t) \\
& \rightarrow \text{ort}(s, t) = \text{pos}_1(r, t) \\
& \quad \wedge \text{winkel}(s, t) = \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_1(r, t)) - 90)
\end{aligned}$$

- u12.** Der Roboter bewegt eine gehaltene Schiene mit seinem Arm 2 mit

$$\begin{aligned}
& \forall [r, x, s, t] (\\
& \quad \text{roboter}(r, x) \\
& \quad \wedge \text{haelt}_2(r, s, t) \\
& \rightarrow \text{ort}(s, t) = \text{pos}_2(r, t) \\
& \quad \wedge \text{winkel}(s, t) = \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_2(r, t)) - 90)
\end{aligned}$$

- u13.** Wenn der Roboter mit Arm 1 eine Schiene hält und dann direkt über einer freien Arbeitsfläche losläßt, bleibt sie darauf liegen

- $\forall[r, x, t_2, s, x_1] ($
 $\text{roboter}(r, x)$
 $\wedge \exists[t] (t < t_2 \wedge \forall[t_1] (t \leq t_1 < t_2 \rightarrow \text{haelt}_1(r, s, t_1)))$
 $\wedge \forall[s_1] (\text{ort}(s_1, t_2) = x_1 \rightarrow s_1 = s)$
 $\wedge \text{pos}_1(r, t_2) = x_1$
 $\wedge \neg \text{greift}_1(r, t_2)$
 $\wedge \text{hoehe}(\text{proj_xy}(x_1), t_2) = \text{proj_z}(x_1)$
 $\rightarrow \text{ort}(s, t_2) = x_1)$
- u14.** Wenn der Roboter mit Arm 2 eine Schiene hält und dann direkt über einer freien Arbeitsfläche losläßt, bleibt sie darauf liegen
- $\forall[r, x, t_2, s, x_1] ($
 $\text{roboter}(r, x)$
 $\wedge \exists[t] (t < t_2 \wedge \forall[t_1] (t \leq t_1 < t_2 \rightarrow \text{haelt}_2(r, s, t_1)))$
 $\wedge \text{pos}_2(r, t_2) = x_1$
 $\wedge \neg \text{greift}_2(r, t_2)$
 $\wedge \text{hoehe}(\text{proj_xy}(x_1), t_2) = \text{proj_z}(x_1)$
 $\rightarrow \text{ort}(s, t_2) = x_1)$
- u15.** Die Roboter-Arme haben feste Höhe
- $\forall[r, x, t] ($
 $\text{roboter}(r, x)$
 $\rightarrow \text{proj_z}(\text{pos}_1(r, t)) = \text{zp_mitte}$
 $\wedge \text{proj_z}(\text{pos}_2(r, t)) = \text{zp_unten})$
- u16.** Wenn sich der Roboter nur lange genug vordreht, kann er für Arm 1 jeden Winkel zwischen dem jetzigen und 270° erreichen
- $\forall[r, x, \alpha, t] ($
 $\text{roboter}(r, x)$
 $\wedge \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_1(r, t)) \leq \alpha \leq 270$
 $\rightarrow (\forall[t_1] (t \leq t_1 < \text{trv}_1(r, \alpha, t) \rightarrow \text{dreht_vor}(r, t_1)) \rightarrow \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_1(r, \text{trv}_1(r, \alpha, t))) = \alpha)$
 $\wedge \forall[t_3] (t \leq t_3 < \text{trv}_1(r, \alpha, t) \rightarrow \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_1(r, t_3)) < \alpha))$
- u17.** Wenn sich der Roboter nur lange genug zurückdreht, kann er für Arm 1 jeden Winkel zwischen dem jetzigen und 90° erreichen
- $\forall[r, x, \alpha, t] ($
 $\text{roboter}(r, x)$
 $\wedge 90 \leq \alpha \leq \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_1(r, t))$
 $\rightarrow (\forall[t_1] (t \leq t_1 < \text{trz}_1(r, \alpha, t) \rightarrow \text{dreht_zurueck}(r, t_1))$
 $\rightarrow \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_1(r, \text{trz}_1(r, \alpha, t))) = \alpha)$
 $\wedge \forall[t_3] (t \leq t_3 < \text{trz}_1(r, \alpha, t) \rightarrow \alpha < \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_1(r, t_3))))$
- u18.** Wenn sich der Roboter nur lange genug vordreht, kann er für Arm 2 jeden Winkel zwischen dem jetzigen und 360° erreichen
- $\forall[r, x, \alpha, t] ($
 $\text{roboter}(r, x)$
 $\wedge \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_2(r, t)) \leq \alpha \leq 360$
 $\rightarrow (\forall[t_1] (t \leq t_1 < \text{trv}_2(r, \alpha, t) \rightarrow \text{dreht_vor}(r, t_1)) \rightarrow \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_2(r, \text{trv}_2(r, \alpha, t))) = \alpha)$
 $\wedge \forall[t_3] (t \leq t_3 < \text{trv}_2(r, \alpha, t) \rightarrow \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_2(r, t_3)) < \alpha))$
- u19.** Wenn sich der Roboter nur lange genug zurückdreht, kann er für Arm 2 jeden Winkel zwischen dem jetzigen und 180° erreichen
- $\forall[r, x, \alpha, t] ($
 $\text{roboter}(r, x)$
 $\wedge 180 \leq \alpha \leq \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_2(r, t))$
 $\rightarrow (\forall[t_1] (t \leq t_1 < \text{trz}_2(r, \alpha, t) \rightarrow \text{dreht_zurueck}(r, t_1))$
 $\rightarrow \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_2(r, \text{trz}_2(r, \alpha, t))) = \alpha)$
 $\wedge \forall[t_3] (t \leq t_3 < \text{trz}_2(r, \alpha, t) \rightarrow \alpha < \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_2(r, t_3))))$

u20. Wenn Arm 1 nur lange genug ausfährt, kann er jede Länge zwischen der jetzigen und $maxlg_1$ erreichen

$$\begin{aligned} & \forall [r, x, t, d] (\\ & \quad \text{roboter}(r, x) \\ & \quad \wedge \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t)) \leq d \leq \text{maxlg}_1 \\ & \rightarrow (\forall [t_1] (t \leq t_1 < \text{tra}_1(r, d, t) \rightarrow \text{faehrt_aus}_1(r, t_1)) \rightarrow \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, \text{tra}_1(r, d, t))) = d) \\ & \quad \wedge \forall [t_3] (t \leq t_3 < \text{tra}_1(r, d, t) \rightarrow \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t_3)) < d)) \end{aligned}$$

u21. Nur wenn Arm 1 ausfährt, kann seine Länge größer werden

$$\begin{aligned} & \forall [r, x, t, t_2] (\\ & \quad \text{roboter}(r, x) \\ & \quad \wedge t \leq t_2 \\ & \quad \wedge \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t)) < \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t_2)) \\ & \rightarrow \exists [t_1] (t < t_1 < t_2 \wedge \text{faehrt_aus}_1(r, t_1)) \end{aligned}$$

u22. Wenn Arm 1 nur lange genug einfährt, kann er jede Länge zwischen der jetzigen und $minlg_1$ erreichen

$$\begin{aligned} & \forall [r, x, t, d] (\\ & \quad \text{roboter}(r, x) \\ & \quad \wedge \text{minlg}_1 \leq d \leq \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t)) \\ & \rightarrow (\forall [t_1] (t \leq t_1 < \text{tre}_1(r, d, t) \rightarrow \text{faehrt_ein}_1(r, t_1)) \rightarrow \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, \text{tre}_1(r, d, t))) = d) \\ & \quad \wedge \forall [t_3] (t \leq t_3 < \text{tre}_1(r, d, t) \rightarrow d < \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t_3))) \end{aligned}$$

u23. Nur wenn Arm 1 einfährt, kann seine Länge kleiner werden

$$\begin{aligned} & \forall [r, x, t, t_2] (\\ & \quad \text{roboter}(r, x) \\ & \quad \wedge t \leq t_2 \\ & \quad \wedge \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t_2)) < \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t)) \\ & \rightarrow \exists [t_1] (t < t_1 < t_2 \wedge \text{faehrt_ein}_1(r, t_1)) \end{aligned}$$

u24. Wenn Arm 2 nur lange genug ausfährt, kann er jede Länge zwischen der jetzigen und $maxlg_2$ erreichen

$$\begin{aligned} & \forall [r, x, t, d] (\\ & \quad \text{roboter}(r, x) \\ & \quad \wedge \text{dist_xy}(x, \text{pos}_2(r, t)) \leq d \leq \text{maxlg}_2 \\ & \rightarrow (\forall [t_1] (t \leq t_1 < \text{tra}_2(r, d, t) \rightarrow \text{faehrt_aus}_2(r, t_1)) \rightarrow \text{dist_xy}(x, \text{pos}_2(r, \text{tra}_2(r, d, t))) = d) \\ & \quad \wedge \forall [t_3] (t \leq t_3 < \text{tra}_2(r, d, t) \rightarrow \text{dist_xy}(x, \text{pos}_2(r, t_3)) < d)) \end{aligned}$$

u25. Wenn Arm 2 nur lange genug einfährt, kann er jede Länge zwischen der jetzigen und $minlg_2$ erreichen

$$\begin{aligned} & \forall [r, x, t, d] (\\ & \quad \text{roboter}(r, x) \\ & \quad \wedge \text{minlg}_2 \leq d \leq \text{dist_xy}(x, \text{pos}_2(r, t)) \\ & \rightarrow (\forall [t_1] (t \leq t_1 < \text{tre}_2(r, d, t) \rightarrow \text{faehrt_ein}_2(r, t_1)) \rightarrow \text{dist_xy}(x, \text{pos}_2(r, \text{tre}_2(r, d, t))) = d) \\ & \quad \wedge \forall [t_3] (t \leq t_3 < \text{tre}_2(r, d, t) \rightarrow d < \text{dist_xy}(x, \text{pos}_2(r, t_3))) \end{aligned}$$

u26. Die Winkel der Arme bleiben unverändert, wenn sich der Roboter nicht dreht

$$\begin{aligned} & \forall [r, x, t, t_2] (\\ & \quad \text{roboter}(r, x) \\ & \quad \wedge \forall [t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \rightarrow \neg \text{dreht_vor}(r, t_1) \wedge \neg \text{dreht_zurueck}(r, t_1)) \\ & \rightarrow \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_1(r, t)) = \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_1(r, t_2)) \\ & \quad \wedge \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_2(r, t)) = \text{winkel_xy}(x, \text{pos}_2(r, t_2)) \end{aligned}$$

u27. Die Länge von Arm 1 bleibt unverändert, wenn ihn der Roboter weder ein- noch ausfährt

$$\begin{aligned} & \forall [r, x, t, t_2] (\\ & \quad \text{roboter}(r, x) \\ & \quad \wedge \forall [t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \rightarrow \neg \text{faehrt_aus}_1(r, t_1) \wedge \neg \text{faehrt_ein}_1(r, t_1)) \\ & \rightarrow \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t)) = \text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r, t_2)) \end{aligned}$$

u28. Die Länge von Arm 2 bleibt unverändert, wenn ihn der Roboter weder ein- noch ausfährt

$$\begin{aligned} & \forall[r, x, t, t_2] (\\ & \quad \text{roboter}(r, x) \\ & \wedge \forall[t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \rightarrow \neg \text{faehrt_aus}_2(r, t_1) \wedge \neg \text{faehrt_ein}_2(r, t_1)) \\ & \rightarrow \text{dist_xy}(x, \text{pos}_2(r, t)) = \text{dist_xy}(x, \text{pos}_2(r, t_2))) \end{aligned}$$

u29. $\forall[r, x, t, s] ($
 $\quad \text{roboter}(r, x)$
 $\rightarrow (\text{haelt}_1(r, s, t) \wedge (\text{faehrt_aus}_1(r, t)$
 $\quad \vee \text{faehrt_ein}_1(r, t)$
 $\quad \vee \text{dreht_vor}(r, t)$
 $\quad \vee \text{dreht_zurueck}(r, t))$
 $\quad \vee \text{haelt}_2(r, s, t) \wedge (\text{faehrt_aus}_2(r, t)$
 $\quad \vee \text{faehrt_ein}_2(r, t)$
 $\quad \vee \text{dreht_vor}(r, t)$
 $\quad \vee \text{dreht_zurueck}(r, t))$
 $\leftrightarrow \text{bewegt}(r, s, t)))$

u29a. explizite Skolemfunktionen

$$\begin{aligned} & \forall[r, d, \alpha, t] (\\ & \quad t \leq \text{trv}_1(r, \alpha, t) \\ & \wedge t \leq \text{trv}_2(r, \alpha, t) \\ & \wedge t \leq \text{trz}_1(r, \alpha, t) \\ & \wedge t \leq \text{trz}_2(r, \alpha, t) \\ & \wedge t \leq \text{tre}_1(r, d, t) \\ & \wedge t \leq \text{tre}_2(r, d, t) \\ & \wedge t \leq \text{tra}_1(r, d, t) \\ & \wedge t \leq \text{tra}_2(r, d, t) \end{aligned}$$

u30. Motorsteuerung und Sensoren
 c_1 : +1 Arm 1 aus, 0 Arm 1 stop
 c_2 : +1 Arm 1 ein, 0 Arm 1 stop
 c_3 : +1 Arm 2 aus, 0 Arm 2 stop
 c_4 : +1 Arm 2 ein, 0 Arm 2 stop
 c_5 : +1 Arm 1 greift
 c_6 : +1 Arm 2 greift
 c_7 : +1 dreht vor, 0 stop
 c_8 : +1 dreht zurück, 0 stop
 s_1 : Länge von Arm 1
 s_2 : Länge von Arm 2
 s_3 : Winkel von Arm 1

$$\begin{aligned} & \forall[c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3, x, t] (\\ & \quad \text{roboter}(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), x) \\ & \rightarrow (\text{faehrt_aus}_1(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_1, t) = 1) \\ & \wedge (\text{faehrt_ein}_1(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_2, t) = 1) \\ & \wedge (\text{faehrt_aus}_2(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_3, t) = 1) \\ & \wedge (\text{faehrt_ein}_2(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_4, t) = 1) \\ & \wedge (\text{greift}_1(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_5, t) = 1) \\ & \wedge (\text{greift}_2(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_6, t) = 1) \\ & \wedge (\text{dreht_vor}(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_7, t) = 1) \\ & \wedge (\text{dreht_zurueck}(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_8, t) = 1) \\ & \wedge (\text{dist_xy}(x, \text{pos}_1(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t)) = \text{val}(s_1, t)) \\ & \wedge (\text{dist_xy}(x, \text{pos}_2(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t)) = \text{val}(s_2, t)) \\ & \wedge (\text{winkel_xy}(x, \text{pos}_1(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), t)) = \text{val}(s_3, t))) \end{aligned}$$

Hubdrehtisch

- u32.** Die Höhe einer auf dem Hubdrehtisch liegenden Schiene bleibt unverändert, solange er weder hebt noch senkt

$$\begin{aligned} & \forall [h, t, x, s, t_2] (\\ & \quad \text{hubdrehtisch}(h, x) \\ & \quad \wedge \text{proj_xy}(\text{ort}(s, t)) = \text{proj_xy}(x) \\ & \quad \wedge t \leq t_2 \\ & \quad \wedge \forall [m, t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \wedge \text{bewegt}(m, s, t_1) \rightarrow m = h) \\ & \quad \wedge \forall [t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \rightarrow \neg \text{hebt}(h, t_1) \wedge \neg \text{senkt}(h, t_1)) \\ & \rightarrow \text{proj_z}(\text{ort}(s, t)) = \text{proj_z}(\text{ort}(s, t_2))) \end{aligned}$$

- u33.** Der Winkel einer auf dem Hubdrehtisch liegenden Schiene bleibt unverändert, solange er sich nicht dreht

$$\begin{aligned} & \forall [h, t, x, s, t_2] (\\ & \quad \text{hubdrehtisch}(h, x) \\ & \quad \wedge \text{proj_xy}(\text{ort}(s, t)) = \text{proj_xy}(x) \\ & \quad \wedge t \leq t_2 \\ & \quad \wedge \forall [m, t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \wedge \text{bewegt}(m, s, t_1) \rightarrow m = h) \\ & \quad \wedge \forall [t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \rightarrow \neg \text{dreht_vor}(h, t_1) \wedge \neg \text{dreht_zurueck}(h, t_1)) \\ & \rightarrow \text{winkel}(s, t) = \text{winkel}(s, t_2)) \end{aligned}$$

- u34.** Der Hubdrehtisch dreht eine auf ihm liegende Schiene entsprechend mit

$$\begin{aligned} & \forall [h, t, x, s, t_2] (\\ & \quad \text{hubdrehtisch}(h, x) \\ & \quad \wedge \text{proj_xy}(\text{ort}(s, t)) = \text{proj_xy}(x) \\ & \quad \wedge t \leq t_2 \\ & \quad \wedge \forall [m, t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \wedge \text{bewegt}(m, s, t_1) \rightarrow m = h) \\ & \rightarrow \text{winkel}(s, t_2) - \text{winkel}(s, t) = \text{winkel}(h, t_2) - \text{winkel}(h, t)) \end{aligned}$$

- u35.** Wenn sich der Hubdrehtisch nur lange genug vordreht, kann er jeden Winkel zwischen dem jetzigen und 360° erreichen

$$\begin{aligned} & \forall [h, x, t, \alpha] \exists [t_2] (\\ & \quad \text{hubdrehtisch}(h, x) \\ & \quad \wedge \text{winkel}(h, t) \leq \alpha \leq 360 \\ & \rightarrow (\forall [t_1] (t \leq t_1 < t_2 \rightarrow \text{dreht_vor}(h, t_1)) \rightarrow \text{winkel}(h, t_2) = \alpha) \\ & \quad \wedge \forall [t_3] (t \leq t_3 < t_2 \rightarrow \neg \text{winkel}(h, t_3) = \alpha)) \end{aligned}$$

- u36.** Wenn sich der Hubdrehtisch nur lange genug zurückdreht, kann er jeden Winkel zwischen dem jetzigen und 0° erreichen

$$\begin{aligned} & \forall [h, x, t, \alpha] \exists [t_2] (\\ & \quad \text{hubdrehtisch}(h, x) \\ & \quad \wedge 0 \leq \alpha \leq \text{winkel}(h, t) \\ & \rightarrow (\forall [t_1] (t \leq t_1 < t_2 \rightarrow \text{dreht_zurueck}(h, t_1)) \rightarrow \text{winkel}(h, t_2) = \alpha) \\ & \quad \wedge \forall [t_3] (t \leq t_3 < t_2 \rightarrow \neg \text{winkel}(h, t_3) = \alpha)) \end{aligned}$$

- u37.** Wenn sich der Hubdrehtisch nur lange genug hebt, erreicht er schließlich die obere Position

$$\begin{aligned} & \forall [t] \exists [t_2] \forall [h, x] (\\ & \quad \text{hubdrehtisch}(h, x) \\ & \rightarrow (\forall [t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \rightarrow \text{hebt}(h, t_1)) \rightarrow \text{hoehe}(\text{proj_xy}(x), t_2) = \text{zh_oben}) \\ & \quad \wedge \forall [t_3] (t \leq t_3 < t_2 \rightarrow \neg \text{hoehe}(\text{proj_xy}(x), t_3) = \text{zh_oben})) \end{aligned}$$

- u38.** Wenn sich der Hubdrehtisch nur lange genug senkt, erreicht er schließlich die untere Position

$$\begin{aligned} & \forall [t] \exists [t_2] \forall [h, x] (\\ & \quad \text{hubdrehtisch}(h, x) \\ & \rightarrow (\forall [t_1] (t \leq t_1 \leq t_2 \rightarrow \text{senkt}(h, t_1)) \rightarrow \text{hoehe}(\text{proj_xy}(x), t_2) = \text{zh_unten}) \\ & \quad \wedge \forall [t_3] (t \leq t_3 < t_2 \rightarrow \neg \text{hoehe}(\text{proj_xy}(x), t_3) = \text{zh_unten})) \end{aligned}$$

- u39.** Motorsteuerung und Sensoren

c_1 : +1 hebt, 0 steht

c_2 : +1 senkt, 0 steht
 c_3 : +1 dreht vor, 0 steht
 c_4 : +1 dreht zurück, 0 steht
 s_1 : +1 unten
 s_2 : +1 oben
 s_3 : Winkel
 $\forall [c_1, c_2, c_3, c_4, s_1, s_2, s_3, t, x] ($
 $\quad \text{hubdrehtisch}(h(c_1, c_2, c_3, c_4, s_1, s_2, s_3), x)$
 $\rightarrow (\text{hebt}(h(c_1, c_2, c_3, c_4, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_1, t) = 1)$
 $\wedge (\text{senkt}(h(c_1, c_2, c_3, c_4, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_2, t) = 1)$
 $\wedge (\text{dreht_vor}(h(c_1, c_2, c_3, c_4, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_3, t) = 1)$
 $\wedge (\text{dreht_zurueck}(h(c_1, c_2, c_3, c_4, s_1, s_2, s_3), t) \leftrightarrow \text{val}(c_4, t) = 1)$
 $\wedge (\text{hoehe}(\text{proj_xy}(x), t) = \text{zh_unten} \leftrightarrow \text{val}(s_1, t) = 1)$
 $\wedge (\text{hoehe}(\text{proj_xy}(x), t) = \text{zh_oben} \leftrightarrow \text{val}(s_2, t) = 1)$
 $\wedge (\text{winkel}(h(c_1, c_2, c_3, c_4, s_1, s_2, s_3), t) = \text{val}(s_3, t)))$

Förderband

- u40.** Wenn das Förderband nur lange genug läuft, transportiert es eine auf ihm liegende Schiene vom Anfang zum Ende

$\forall [f, s, t, x_1, x_2] \exists [t_2] ($
 $\quad \text{foerderband}(f, x_1, x_2)$
 $\wedge \text{ort}(s, t) = x_1$
 $\rightarrow (\forall [t_1] (t \leq t_1 < t_2 \rightarrow \text{laeuft}(f, t_1)) \rightarrow \text{ort}(s, t_2) = x_2)$
 $\wedge \forall [t_3] (t \leq t_3 < t_2 \rightarrow \neg \text{ort}(s, t_3) = x_2))$

- u41.** Motorsteuerung und Sensoren

c_1 : 0 steht, +1 läuft
 s_1 : +1 Ende
 $\forall [c_1, s_1, x_1, x_2, t] ($
 $\quad \text{foerderband}(f(c_1, s_1), x_1, x_2)$
 $\rightarrow (\text{laeuft}(f(c_1, s_1), t) \leftrightarrow \text{val}(c_1, t) = 1)$
 $\wedge ((\exists [s] \text{ort}(s, t) = x_2) \leftrightarrow \text{val}(s_1, t) = 1))$

Gesamte Fabrik

- u42.** Konfiguration der Fabrik

c_1 Zuführförderband laufen
 c_2 Hubdrehtisch heben
 c_3 Hubdrehtisch senken
 c_4 Hubdrehtisch vor drehen
 c_5 Hubdrehtisch zurück drehen
 c_6 Roboter Arm 1 aus
 c_7 Roboter Arm 1 ein
 c_8 Roboter Arm 2 aus
 c_9 Roboter Arm 2 ein
 c_{10} Roboter Arm 1 greifen
 c_{11} Roboter Arm 2 greifen
 c_{12} Roboter vor drehen
 c_{13} Roboter zurück drehen
 c_{14} Presse heben
 c_{15} Presse senken

c_{16} Ablageförderband laufen
 s_1 Zuführförderband (1:Ende)
 s_2 Hubdrehtisch Vertikal (1:unten)
 s_3 Hubdrehtisch Vertikal (1:oben)
 s_4 Hubdrehtisch Drehung (Winkel)
 s_5 Roboter Arm 1 (Länge)
 s_6 Roboter Arm 2 (Länge)
 s_7 Roboter Drehung (Winkel Arm 1)
 s_8 Presse (1:unten)
 s_9 Presse (1:mitte)
 s_{10} Presse (1:oben)
 s_{11} Ablageförderband (1:Ende)
 d_1 Standort Zuführförderband Anfang
 d_2 Standort Zuführförderband Ende
 d_3 Standort Hubdrehtisch
 d_4 Standort Roboter
 d_5 Standort Presse
 d_6 Standort Ablageförderband Anfang
 d_7 Standort Ablageförderband Ende
 $\forall [c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}, c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{14}, c_{15}, c_{16},$
 $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}, s_{11}, x] ($
 $fabrik(fa(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}, c_{11}, c_{12}, c_{13}, c_{14}, c_{15}, c_{16},$
 $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}, s_{11}), x)$

$\leftrightarrow foerderband(f(c_1, s_1), x + d_1, x + d_2)$
 $\wedge hubdrehtisch(h(c_2, c_3, c_4, c_5, s_2, s_3, s_4), x + d_3)$
 $\wedge roboter(r(c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}, c_{11}, c_{12}, c_{13}, s_5, s_6, s_7), x + d_4)$
 $\wedge presse(p(c_{14}, c_{15}, s_8, s_9, s_{10}), x + d_5)$
 $\wedge foerderband(f(c_{16}, s_{11}), x + d_6, x + d_7)$
 $\wedge \forall [s, t] \exists [t_2] (ort(s, t) = x + d_1 \wedge bearbeitungszustand(s, t) = unbearbeitet$
 $\rightarrow ort(s, t_2) = x + d_7 \wedge bearbeitungszustand(s, t_2) = bearbeitet))$

u43. Das Handhabungsgerät “verbraucht” die Schienen beim Zurückführen, um einen geschlossenen Kreislauf zu ermöglichen

c_{17} Handhabungsgerät links
 c_{18} Handhabungsgerät rechts
 c_{19} Handhabungsgerät heben
 c_{20} Handhabungsgerät senken
 c_{21} Handhabungsgerät greifen
 s_{12} Handhabungsgerät Horizontal (1:links)
 s_{13} Handhabungsgerät Horizontal (1:rechts)
 s_{14} Handhabungsgerät Vertikal (Höhe)
 d_8 Standort Handhabungsgerät Ende (links)
 d_9 Standort Handhabungsgerät Anfang (rechts)
 $\forall [c_{17}, c_{18}, c_{19}, c_{20}, c_{21}, s_{12}, s_{13}, s_{14}, x] ($
 $verbraucher(v(c_{17}, c_{18}, c_{19}, c_{20}, c_{21}, s_{12}, s_{13}, s_{14}), x)$
 $\leftrightarrow handhabungsgeraet(ha(c_{17}, c_{18}, c_{19}, c_{20}, c_{21}, s_{12}, s_{13}, s_{14}), x + d_8, x + d_9)$
 $\wedge \forall [s, t] \exists [t_2] (ort(s, t) = x + d_9 \wedge bearbeitungszustand(s, t) = bearbeitet$
 $\rightarrow ort(s, t_2) = x + d_8 \wedge bearbeitungszustand(s, t_2) = unbearbeitet))$

u44. Nur die Presse bearbeitet Schienen,

$\forall [s, t, t_2] ($
 $bearbeitungszustand(s, t) = unbearbeitet$
 $\wedge bearbeitungszustand(s, t_2) = bearbeitet$
 $\rightarrow \exists [t_1, p, x] (t \leq t_1 \leq t_2 \wedge presse(p, x) \wedge bewegt(p, s, t)))$

u45. Nur das Handhabungsgerät “verbraucht” Schienen

$$\begin{aligned} & \forall [s, t, t_2] (\\ & \quad \text{bearbeitungszustand}(s, t) = \text{bearbeitet} \\ & \quad \wedge \text{bearbeitungszustand}(s, t_2) = \text{unbearbeitet} \\ & \rightarrow \exists [t_1, h, x_1, x_2] (t \leq t_1 \leq t_2 \wedge \text{handhabungsgeraet}(h, x_1, x_2) \wedge \text{bewegt}(h, s, t)) \end{aligned}$$

u46. Hubdrehtisch in oberer Position und Presse in unterer Position haben die gleiche Höhe

$$zh_oben = zp_mitte$$

u47. Roboter und Presse stehen im richtigen Winkel zueinander

$$\text{winkel_xy}(d_4, d_5) = 270$$

u47a. Roboterarm 1 kann schneller eingezogen werden als vom Hubdrehtisch zur Presse vorgedreht werden

$$\begin{aligned} & \forall [r, t] (\\ & \quad \text{roboter}(r, d_4) \\ & \quad \wedge \text{pos}_1(r, t) = d_3 \\ & \rightarrow \text{tr}_{e1}(r, \text{dist_xy}(d_4, d_5), t) < \text{tr}_{v1}(r, \text{winkel_xy}(d_4, d_5), t) \end{aligned}$$

u47b. Roboter und Hubdrehtisch stehen nahe genug beieinander

$$\text{dist_xy}(d_4, d_3) \leq \text{maxlg}_1$$

Physik

u48. Schwerkraftgesetz

$$\begin{aligned} & \forall [s, t] (\\ & \quad \text{proj_z}(\text{ort}(s, t)) = \text{hoehe}(\text{proj_xy}(\text{ort}(s, t)), t) \end{aligned}$$

u49. Zwei Dinge sind nicht gleichzeitig am selben Ort

$$\begin{aligned} & \forall [s_1, s_2, t] (\\ & \quad \text{ort}(s_1, t) = \text{ort}(s_2, t) \\ & \rightarrow s_1 = s_2) \end{aligned}$$

u50. Kein Ding bewegt sich von selbst

$$\begin{aligned} & \forall [s, t, t_2] (\\ & \quad t \leq t_2 \\ & \quad \wedge (\neg \text{ort}(s, t) = \text{ort}(s, t_2) \vee \neg \text{winkel}(s, t) = \text{winkel}(s, t_2)) \\ & \rightarrow \exists [m, t_1] \text{bewegt}(m, s, t_1)) \end{aligned}$$

Mathematik

u51. Dreidimensionaler Raum

$$\begin{aligned} & \forall [x, x_1] (\\ & \quad \text{proj_xy}(x) = \text{proj_xy}(x_1) \\ & \quad \wedge \text{proj_z}(x) = \text{proj_z}(x_1) \\ & \rightarrow x = x_1) \end{aligned}$$

u62. Gleichheit

$$\forall [aa] (aa = aa)$$

u66. Lineare Ordnungsrelation

$$\forall [aa, bb] (\neg bb \leq aa \leftrightarrow aa < bb)$$

u66b. $\forall [aa, bb] (aa < bb \rightarrow aa \leq bb)$

u66c. $\forall [aa, bb, cc] (aa < bb < cc \rightarrow aa < cc)$

u66d. $\forall [aa, bb, cc] (aa \leq bb < cc \rightarrow aa < cc)$

u66f. $\forall [aa, bb, cc] (aa < bb \leq cc \rightarrow aa < cc)$

u66e. $\forall [aa, bb, cc] (aa \leq bb \leq cc \rightarrow aa \leq cc)$

u61. Archimedischer Körper

$$\forall [aa, bb] (aa * (-1) < bb * (-1) \leftrightarrow bb < aa)$$

u67. Polarkoordinaten

$\forall [x, x_1, x_2] ($
 $winkel_xy(x_2, x) = winkel_xy(x_2, x_1)$
 $\wedge dist_xy(x_2, x) = dist_xy(x_2, x_1)$
 $\rightarrow proj_xy(x) = proj_xy(x_1))$

u69. Arithmetik

$270 - 90 = 180$

u69a. Aussagenlogik

$aaa \wedge bbb \rightarrow aaa$

u69c. $aaa \wedge bbb \rightarrow bbb$

u69d. $aaa \rightarrow (\neg aaa \rightarrow bbb)$

Steuerung

u70. Steigende Flanke

$\forall [c, t] ($
 $up(c, t)$
 $\leftrightarrow val(c, t) = 1$
 $\wedge \exists [t_1] (t_1 < t \wedge \forall [t_2] (t_1 < t_2 < t \rightarrow \neg val(c, t_2) = 1)))$

u71. Flanken-getriggertes Flip-Flop

ca ___-----___
cb -----__-_____
out ___-----_____
 $\forall [ca, cb, t_2] ($
 $val(df\,f(ca, cb), t_2) = 1$
 $\leftrightarrow \exists [t] (t \leq t_2 \wedge up(ca, t) \wedge \forall [t_1] (t \leq t_1 < t_2 \rightarrow \neg up(cb, t_1))))$

u72. Zeitverzögerung

c ___---_____
out -----__-_____
 | |
 t t+d
 $\forall [c, d, t] \, val(mff(c, d), t + d) = val(c, d)$

u73. Trigger

c _- _- _- _- v _-
 _- _-

out ___---_____
 $\forall [c, v, t] ($
 $val(trigger(c, v), t) = 1$
 $\leftrightarrow val(c, t) < v)$

u74. Inverter

c ___---_____
out ---__-_____
 $\forall [c, t] ($
 $val(neg(c), t) = 1$
 $\leftrightarrow \neg val(c, t) = 1)$

u75. Oder-Gatter

ca -----
cb -----
out -----
 $\forall [ca, cb, t] ($
 $val(or(ca, cb), t) = 1$
 $\leftrightarrow val(ca, t) = 1 \vee val(cb, t) = 1)$

u76. Und-Gatter

```

ca  -----
cb  --- ---
out -----
 $\forall[ca, cb, t] ($ 
 $val(and(ca, cb), t) = 1$ 
 $\leftrightarrow val(ca, t) = 1$ 
 $\wedge val(cb, t) = 1)$ 

```

u77. Verstärker

$\forall[c, v, t] (val(ampl(c, v), t) = val(c, t) * v)$

Modul 1 der Robotersteuerung

r1. $up(ci, t_0)$

r2. $ort(s_0, t_0) = d_3$

r3. $pos_1(r, t_0) = d_3$

r4. $winkel(s_0, t_0) = winkel_xy(d_4, d_3) - 90$

r6. $dist_xy(d_4, d_5) \leq dist_xy(d_4, pos_1(r, t_0))$

r7. $minlg_1 \leq dist_xy(d_4, d_5)$

r8. $winkel_xy(d_4, d_5) \leq 270$

r9. $winkel_xy(d_4, pos_1(r, t_0)) \leq winkel_xy(d_4, d_5)$

r10. $\forall[t, r]$

$(t_0 \leq t \leq trv_1(r, 270, t_0))$

$\rightarrow \neg val(cfa_1, t) = 1 \wedge \neg val(cfe_1, t) = 1$

$\wedge \neg val(cdrv, t) = 1 \wedge \neg val(cgr_1, t) = 1)$

r11. $roboter(r(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, s_1, s_2, s_3), d_4)$

r20. BEWEISZIEL:

$proj_xy(pos_1(r, t)) = proj_xy(d_5)$

$\wedge ort(s_0, t) = pos_1(r, t)$

$\wedge winkel(s_0, t) = 180$

$\wedge up(co, t)$

C Deduktive Synthese eines einzelnen Steuerungsmoduls

```

112u75  (val(or(ca1,cb1),t34) = 1 -> val(ca1,t34) = 1 ! val(cb1,t34) = 1)
      & (val(or(ca1,cb1),t34) = 1 <- val(ca1,t34) = 1 ! val(cb1,t34) = 1) , -
116sp  val(ca1,t34) = 1 ! val(cb1,t34) = 1 -> val(or(ca1,cb1),t34) = 1 , -
|
| 113u76  (val(and(ca2,cb2),t35) = 1 -> val(ca2,t35) = 1 & val(cb2,t35) = 1)
|      & (val(and(ca2,cb2),t35) = 1 <- val(ca2,t35) = 1 & val(cb2,t35) = 1) , -
118sp  val(ca2,t35) = 1 & val(cb2,t35) = 1 -> val(and(ca2,cb2),t35) = 1 , -
119re  val(ca1,t34)=1 ! val(ca2,t34)=1&val(cb2,t34)=1 -> val(or(ca1,and(ca2,cb2)),t34)=1 , -
|
|
| 71u30  rob(r(),x9) -> (fa1(r(),t20) -> val(c2,t20) = 1)
|      & (fa1(r(),t20) <- val(c2,t20) = 1)
|      & ((fe1(r(),t20) -> val(c3,t20) = 1)
|      & (fe1(r(),t20) <- val(c3,t20) = 1))
|      & ((fa2(r(),t20) -> val(c4,t20) = 1)
|      & (fa2(r(),t20) <- val(c4,t20) = 1))
|      & ((fe2(r(),t20) -> val(c22,t20) = 1)
|      & (fe2(r(),t20) <- val(c22,t20) = 1))
|      & ((gr1(r(),t20) -> val(c5,t20) = 1)
|      & (gr1(r(),t20) <- val(c5,t20) = 1))
|      & ((gr2(r(),t20) -> val(c6,t20) = 1)
|      & (gr2(r(),t20) <- val(c6,t20) = 1))
|      & ((drv(r(),t20) -> val(c7,t20) = 1)
|      & (drv(r(),t20) <- val(c7,t20) = 1))
|      & ((drz(r(),t20) -> val(c8,t20) = 1)
|      & (drz(r(),t20) <- val(c8,t20) = 1))
|      & dxy(x9,ps1(r(),t20)) = val(s5,t20)
|      & dxy(x9,ps2(r(),t20)) = val(s6,t20)
|      & wxy(x9,ps1(r(),t20)) = val(s7,t20) , -
|
| 10r11  rob(r(),d4) , -
120re  (fa1(r(),t20) -> val(c2,t20) = 1)
|      & (val(c2,t20) = 1 -> fa1(r(),t20))
|      & (fe1(r(),t20) -> val(c3,t20) = 1)
|      & (val(c3,t20) = 1 -> fe1(r(),t20))
|      & (fa2(r(),t20) -> val(c4,t20) = 1)
|      & (val(c4,t20) = 1 -> fa2(r(),t20))
|      & (fe2(r(),t20) -> val(c22,t20) = 1)
|      & (val(c22,t20) = 1 -> fe2(r(),t20))
|      & (gr1(r(),t20) -> val(c5,t20) = 1)
|      & (val(c5,t20) = 1 -> gr1(r(),t20))
|      & (gr2(r(),t20) -> val(c6,t20) = 1)
|      & (val(c6,t20) = 1 -> gr2(r(),t20))
|      & (drv(r(),t20) -> val(c7,t20) = 1)
|      & (val(c7,t20) = 1 -> drv(r(),t20))
|      & (drz(r(),t20) -> val(c8,t20) = 1)
|      & (val(c8,t20) = 1 -> drz(r(),t20))
|      & dxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s5,t20)
|      & dxy(d4,ps2(r(),t20)) = val(s6,t20)
|      & wxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s7,t20) , -
139sp  wxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s7,t20) , -
|
|
| 120**
| 137sp  dxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s5,t20) , -
|
|
| 108u71  (val(dff(ca,cb),t27) = 1
|      -> t28$ =< t27 & up(ca,t28$)
|      & (t28$=<t29&t29<t27->~up(cb,t29)))
|      & (val(dff(ca,cb),t27) = 1
|      <- t30 =< t27 & up(ca,t30)
|      & (t30 =< t31$ & t31$ < t27
|      -> ~up(cb,t31$))) , -
141sp  t30 =< t27 & up(ca,t30)
|      & (t30 =< t31$ & t31$ < t27
|      -> ~up(cb,t31$))
|      -> val(dff(ca,cb),t27) = 1 , -
|
| 0r1  up(ci,t0) , -
142re  t0 =< t27
|      & (t0 =< t31$ & t31$ < t27
|      -> ~up(cb,t31$))
|      -> val(dff(ci,cb),t27) = 1 , -
|
|
| 107u70  (up(c23,t22)
|      -> val(c23,t22) = 1
|      & (t23$ < t22 & (t23$ < t24
|      & t24 < t22
|      -> ~val(c23,t24) = 1)))

```

```

& (up(c23,t22)
<- val(c23,t22) = 1
& (t25 < t22 & (t25 < t26$
& t26$ < t22
-> ~val(c23,t26$=1))) , -
143sp up(c23,t22)
-> val(c23,t22) = 1
& t23$ < t22
& (t23$ < t24 & t24 < t22
-> ~val(c23,t24) = 1) , -
| 111u74 (val(neg(c24),t33) = 1
-> ~val(c24,t33) = 1)
& (val(neg(c24),t33) = 1
<- ~val(c24,t33) = 1) , -
145sp val(neg(c24),t33) = 1
-> ~val(c24,t33) = 1 , -
147re up(neg(c24),t22)
-> ~val(c24,t22)=1&t23$<t22
& (t23$ < t24 & t24 < t22
->~val(neg(c24),t24)=1) , -
| 111**
146sp ~val(c24,t33) = 1
-> val(neg(c24),t33) = 1 , -
148re up(neg(c24),t22)
-> ~val(c24,t22) = 1 & t23$ < t22
& (t23$ < t24 & t24 < t22
-> val(c24,t24) = 1) , -
| 112**
115sp val(or(ca1,cb1),t34) = 1
-> val(ca1,t34) = 1
! val(cb1,t34) = 1 , -
149re up(neg(or(ca1,cb1)),t22)
-> ~val(or(ca1,cb1),t22) = 1
& t23$ < t22
& (t23$ < t24 & t24 < t22
-> val(ca1,t24) = 1
! val(cb1,t24) = 1) , -
| 116**
150re up(neg(or(ca1,cb1)),t22)
-> ~val(ca1,t22) = 1
& ~val(cb1,t22) = 1 & t23$ < t22
& (t23$ < t24 & t24 < t22
-> val(ca1,t24) = 1
! val(cb1,t24) = 1) , -
151re t0 =< t27
& (t0 =< t31$ & t31$ < t27
& ~val(ca1,t31$) = 1 & ~val(cb1,t31$) = 1
& t23$ < t31$
-> t23$ < t24 & t24 < t31$
& ~val(ca1,t24) = 1 & ~val(cb1,t24) = 1)
-> val(dff(ci,neg(or(ca1,cb1))),t27)=1 , -
| 110u73 (val(trg(c25,v),t32) = 1
-> val(c25,t32) < v)
& (val(trg(c25,v),t32) = 1
<- val(c25,t32) < v) , -
153sp val(c25,t32)<v -> val(trg(c25,v),t32) = 1 , -
154re t0 =< t27
& (t0 =< t31$ & t31$ < t27
& ~val(ca1,t31$) = 1 & ~val(c25,t31$) < v
& t23$ < t31$
-> t23$ < t24 & t24 < t31$
& ~val(ca1,t24) = 1
& ~val(trg(c25,v),t24) = 1)
-> val(dff(ci,neg(or(ca1,trg(c25,v))))),
t27) = 1 , -
153** val(c25,t32) < v -> val(trg(c25,v),t32) = 1 , -
155re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27
& ~val(c10,t31$) < v2 & ~val(c25,t31$) < v
& t23$ < t31$
-> t23$ < t24 & t24 < t31$
& ~val(trg(c10,v2),t24) = 1
& ~val(trg(c25,v),t24) = 1)
-> val(dff(ci,neg(or(trg(c10,v2),

```



```

|                                     & ~wxy(d4,ps1(r()),t37)) < v)
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s8,-1),bb6*-1),
|                                     trg(s10,v))))),t27) = 1 , -
|
|                                     56u16 rob(r4,x5)
|                                     & wxy(x5,ps1(r4,t7)) =< al & al =< 270
|                                     -> ((t7 =< t8$ & t8$ < trv1(r4,al,t7) -> drv(r4,t8$))
|                                     -> wxy(x5,ps1(r4,trv1(r4,al,t7))) = al)
|                                     & (t7=<t9 & t9<trv1(r4,al,t7) -> wxy(x5,ps1(r4,t9))<al) , -
|                                     10** rob(r()),d4) , -
|                                     168re wxy(d4,ps1(r()),t7)) =< al & al =< 270
|                                     -> ((t7 =< t8$ & t8$ < trv1(r()),al,t7) -> drv(r()),t8$))
|                                     -> wxy(d4,ps1(r()),trv1(r()),al,t7))) = al)
|                                     & (t7=<t9&t9<trv1(r()),al,t7) -> wxy(d4,ps1(r()),t9))<al) , -
|                                     7r8 wxy(d4,d5) =< 270 , -
|                                     169re wxy(d4,ps1(r()),t7)) =< wxy(d4,d5)
|                                     -> ((t7=<t8$&t8$<trv1(r()),wxy(d4,d5),t7)->drv(r()),t8$))
|                                     -> wxy(d4,ps1(r()),trv1(r()),wxy(d4,d5),t7)))
|                                     = wxy(d4,d5))
|                                     & (t7 =< t9 & t9 < trv1(r()),wxy(d4,d5),t7)
|                                     -> wxy(d4,ps1(r()),t9)) < wxy(d4,d5)) , -
|                                     8r9 wxy(d4,ps1(r,t0)) =< wxy(d4,d5) , -
|                                     170re ((t0 =< t8$ & t8$ < trv1(r()),wxy(d4,d5),t0) -> drv(r()),t8$))
|                                     -> wxy(d4,ps1(r()),trv1(r()),wxy(d4,d5),t0)))
|                                     = wxy(d4,d5))
|                                     & (t0 =< t9 & t9 < trv1(r()),wxy(d4,d5),t0)
|                                     -> wxy(d4,ps1(r()),t9)) < wxy(d4,d5)) , -
|                                     172sp t0 =< t9 & t9 < trv1(r()),wxy(d4,d5),t0)
|                                     -> wxy(d4,ps1(r()),t9)) < wxy(d4,d5) , -
|                                     173re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r()),t31$))
|                                     & ~t31$ < trv1(r()),wxy(d4,d5),t0) & t23$ < t31$
|                                     -> t23$ < t37 & t37 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r()),t37))
|                                     & ~wxy(d4,ps1(r()),t37)) < wxy(d4,d5))
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s8,-1),bb6*-1),
|                                     trg(s10,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
|                                     97u66c aa3 < bb2 & bb2 < cc -> aa3 < cc , -
|                                     174re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r()),t31$))
|                                     & (t31$ < bb2 -> ~bb2 < trv1(r()),wxy(d4,d5),t0))
|                                     & t23$<t31$ -> t23$<t37 & t37<t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r()),t37))
|                                     & ~wxy(d4,ps1(r()),t37)) < wxy(d4,d5))
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s8,-1),bb6*-1),
|                                     trg(s10,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
|                                     175un t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r()),t31$))
|                                     & ~t27 < trv1(r()),wxy(d4,d5),t0)
|                                     & t23$<t31$ -> t23$<t37 & t37<t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r()),t37))
|                                     & ~wxy(d4,ps1(r()),t37)) < wxy(d4,d5))
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s8,-1),bb6*-1),
|                                     trg(s10,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
|                                     104u69a aaa & bbb -> aaa , -
|                                     176re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r()),t31$))
|                                     & ~t27 < trv1(r()),wxy(d4,d5),t0)
|                                     -> t23$ < t37 & t37 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r()),t37))
|                                     & ~wxy(d4,ps1(r()),t37)) < wxy(d4,d5))
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s8,-1),bb6*-1),
|                                     trg(s10,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
|                                     104** aaa & bbb -> aaa , -
|                                     177re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~t27 < trv1(r()),wxy(d4,d5),t0)
|                                     -> t23$ < t37 & t37 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r()),t37))
|                                     & ~wxy(d4,ps1(r()),t37)) < wxy(d4,d5))
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s8,-1),bb6*-1),
|                                     trg(s10,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
|                                     104** aaa & bbb -> aaa , -
|                                     178re t0=<t27 & (t0=<t31$ & ~t27<trv1(r()),wxy(d4,d5),t0) -> t23$ < t37 & t37 < t31$
|                                     & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r()),t37)) & ~wxy(d4,ps1(r()),t37)) < wxy(d4,d5))
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s8,-1),bb6*-1),
|                                     trg(s10,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
|                                     105u69c aaa & bbb -> bbb , -
|                                     179re t0 =< t27 & (~t27 < trv1(r()),wxy(d4,d5),t0) -> t23$ < t37 & t37 < t31$
|                                     & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r()),t37)) & ~wxy(d4,ps1(r()),t37)) < wxy(d4,d5))
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s8,-1),bb6*-1),
|                                     trg(s10,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
|                                     106u69d aaa -> ~aaa -> bbb , -
|                                     180re t0 =< t27 & t27 < trv1(r()),wxy(d4,d5),t0)
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s8,-1),bb6*-1),
|                                     trg(s10,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
|                                     181re val(cal,t34) = 1 ! t0 =< t34 & t34 < trv1(r()),wxy(d4,d5),t0)
|                                     & val(cb2,t34) = 1

```

```

|                                     -> val(or(ca1,and(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s8,-1),bb6*-1),
|                                     trg(s10,wxy(d4,d5))))),cb2)),t34) = 1 , -
| 139** wxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s7,t20) , -
| 153** val(c25,t32) < v -> val(trg(c25,v),t32) = 1 , -
182rp wxy(d4,ps1(r(),t20)) < v -> val(trg(s7,v),t20) = 1 , -
183re val(ca1,t34) = 1 ! t0 =< t34 & t34 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
|                                     & wxy(d4,ps1(r(),t34)) < v
|                                     -> val(or(ca1,and(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s8,-1),bb6*-1),
|                                     trg(s10,wxy(d4,d5))))),trg(s7,v))),t34) = 1 , -
172** t0 =< t9 & t9 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0) -> wxy(d4,ps1(r(),t9)) < wxy(d4,d5) , -
184re val(ca1,t34) = 1 ! t0 =< t34 & t34 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
|                                     & t34 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
|                                     -> val(or(ca1,and(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s8,-1),bb6*-1),
|                                     trg(s10,wxy(d4,d5))))),trg(s7,wxy(d4,d5))),t34) = 1 , -
185un val(ca1,t34) = 1 ! t0 =< t34
|                                     & t34 < trv1( r(c29,c30,c31,c32,c33,c34,c35,c36,s22,s23,s10) ,wxy(d4,d5),t0)
|                                     -> val(or(ca1,and(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s8,-1),bb6*-1),
|                                     trg(s10,wxy(d4,d5))))),trg(s10,wxy(d4,d5))),t34) = 1 , -
|
|
|                                     154**
|                                     153** val(c25,t32) < v -> val(trg(c25,v),t32) = 1 , -
186re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27
|                                     & ~val(c13,t31$) < v4 & ~val(c25,t31$) < v
|                                     & t23$ < t31$
|                                     -> t23$ < t24 & t24 < t31$
|                                     & ~val(trg(c13,v4),t24) = 1
|                                     & ~val(trg(c25,v),t24) = 1)
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(c13,v4),
|                                     trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
152** val(trg(c25,v),t32) = 1 -> val(c25,t32) < v , -
187re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27
|                                     & ~val(c13,t31$) < v4 & ~val(c25,t31$) < v
|                                     & t23$ < t31$
|                                     -> t23$ < t24 & t24 < t31$
|                                     & ~val(trg(c13,v4),t24) = 1
|                                     & ~val(c25,t24) < v)
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(c13,v4),
|                                     trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
152** val(trg(c25,v),t32) = 1 -> val(c25,t32) < v , -
188re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27
|                                     & ~val(c13,t31$) < v4 & ~val(c25,t31$) < v
|                                     & t23$ < t31$
|                                     -> t23$ < t24 & t24 < t31$
|                                     & ~val(c13,t24) < v4 & ~val(c25,t24) < v)
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(c13,v4),
|                                     trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
114** val(ampl(c9,v1),t36) = val(c9,t36)*v1 , -
189RP t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27
|                                     & ~val(ampl(c9,v1),t31$) < v4
|                                     & ~val(c25,t31$) < v & t23$ < t31$
|                                     -> t23$ < t36 & t36 < t31$ & ~val(c9,t36)*v1 < v4
|                                     & ~val(c25,t36) < v)
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(c9,v1),v4),
|                                     trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
114** val(ampl(c9,v1),t36) = val(c9,t36)*v1 , -
190RP t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27
|                                     & ~val(c14,t31$)*v5 < v4 & ~val(c25,t31$) < v
|                                     & t23$ < t31$
|                                     -> t23$ < t36 & t36 < t31$ & ~val(c14,t36)*v5 < v4
|                                     & ~val(c25,t36) < v)
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(c14,v5),v4),
|                                     trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
160** aa7*-1 < bb6*-1 -> bb6 < aa7 , -
191re t0=<t27 & (t0=<t31$ & t31$<t27 & ~val(c14,t31$)*-1 < bb6*-1
|                                     & ~val(c25,t31$) < v & t23$ < t31$
|                                     -> t23$ < t36 & t36 < t31$ & ~bb6 < val(c14,t36)
|                                     & ~val(c25,t36) < v)
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(c14,-1),bb6*-1),
|                                     trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
161** bb6 < aa7 -> aa7*-1 < bb6*-1 , -
192re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < val(c14,t31$)
|                                     & ~val(c25,t31$) < v & t23$ < t31$
|                                     -> t23$ < t36 & t36 < t31$ & ~bb6 < val(c14,t36)
|                                     & ~val(c25,t36) < v)
|                                     -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(c14,-1),bb6*-1),
|                                     trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
137** dxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s5,t20) , -

```

```

193RP t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < val(s5,t31$)
& ~val(c25,t31$)<v & t23$ < t31$ -> t23$ < t20 & t20 < t31$
& ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t20)) & ~val(c25,t20) < v)
-> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s5,-1),bb6*-1),
trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
137** dxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s5,t20) , -
194RP t0=<t27 & (t0=<t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t31$))
& ~val(c25,t31$)<v & t23$ < t31$ -> t23$ < t20 & t20 < t31$
& ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t20)) & ~val(c25,t20) < v)
-> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s11,-1),bb6*-1),
trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
139** wxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s7,t20) , -
195RP t0=<t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t31$))
& ~val(s12,t31$)<v & t23$ < t31$ -> t23$ < t38 & t38 < t31$
& ~bb6<dxy(d4,ps1(r(),t38)) & ~wxy(d4,ps1(r(),t38))<v)
-> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s11,-1),bb6*-1),
trg(s12,v))))),t27) = 1 , -
139** wxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s7,t20) , -
196RP t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t31$))
& ~wxy(d4,ps1(r(),t31$)) < v & t23$ < t31$
-> t23$ < t38 & t38 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t38))
& ~wxy(d4,ps1(r(),t38)) < v)
-> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s11,-1),bb6*-1),
trg(s14,v))))),t27) = 1 , -
172**
197re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t31$))
& ~t31$ < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0) & t23$ < t31$
-> t23$ < t38 & t38 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t38))
& ~wxy(d4,ps1(r(),t38)) < wxy(d4,d5))
-> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s11,-1),bb6*-1),
trg(s14,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
99u66f aa5 < bb4 & bb4 =< cc2 -> aa5 < cc2 , -
198re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t31$))
& (t31$ < bb4 -> ~bb4 =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)) & t23$ < t31$
-> t23$ < t38 & t38 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t38))
& ~wxy(d4,ps1(r(),t38)) < wxy(d4,d5))
-> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s11,-1),bb6*-1),
trg(s14,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
199un t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t31$))
& ~t27 =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0) & t23$ < t31$
-> t23$ < t38 & t38 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t38))
& ~wxy(d4,ps1(r(),t38)) < wxy(d4,d5))
-> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s11,-1),bb6*-1),
trg(s14,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
104** aaa & bbb -> bbb , -
200re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t31$))
& ~t27 =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
-> t23$ < t38 & t38 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t38))
& ~wxy(d4,ps1(r(),t38)) < wxy(d4,d5))
-> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s11,-1),bb6*-1),
trg(s14,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
105** aaa & bbb -> bbb , -
201re t0 =< t27 & (~t27 =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0) -> t23$ < t38 & t38 < t31$
& ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t38)) & ~wxy(d4,ps1(r(),t38)) < wxy(d4,d5))
-> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s11,-1),bb6*-1),
trg(s14,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
106** aaa -> ~aaa -> bbb , -
202re t0 =< t27 & t27 =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
-> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s11,-1),bb6*-1),
trg(s14,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
116** val(ca1,t34) = 1 ! val(cb1,t34) = 1 -> val(or(ca1,cb1),t34) = 1 , -
203RE val(ca1,t34) = 1 ! t0 =< t34
& t34 =< trv1(r(c37,c38,c39,c40,c41,c42,c43,c26,s24,s25,s14),wxy(d4,d5),t0)
-> val(or(ca1,dff(ci,neg(or(trg(ampl(s11,-1),bb6*-1),
trg(s14,wxy(d4,d5))))),t34) = 1 , -
120**
124sp val(c3,t20) = 1 -> fe1(r(),t20) , -
62u22 rob(r6,x7) & mn1 =< d11 & d11 =< dxy(x7,ps1(r6,t13))
-> ((t13=<t14$&t14$<tre1(r6,d11,t13)->fe1(r6,t14$))
-> dxy(x7,ps1(r6,tre1(r6,d11,t13))) = d11)
& (t13 =< t15 & t15 < tre1(r6,d11,t13)
-> d11 < dxy(x7,ps1(r6,t15))) , -
10** rob(r(),d4) , -
204re mn1 =< d11 & d11 =< dxy(d4,ps1(r(),t13))
->((t13=<t14$&t14$<tre1(r(),d11,t13)->fe1(r(),t14$))

```

```

-> dxy(d4,ps1(r()),tre1(r(),d11,t13))) = d11)
& (t13 =< t15 & t15 < tre1(r(),d11,t13)
-> d11 < dxy(d4,ps1(r(),t15))) , -
6r7 mn1 =< dxy(d4,d5) , -
205re dxy(d4,d5) =< dxy(d4,ps1(r(),t13))
-> ((t13=<t14$ & t14$<tre1(r(),dxy(d4,d5),t13)
-> fe1(r(),t14$))
-> dxy(d4,ps1(r(),tre1(r(),dxy(d4,d5),t13)))
= dxy(d4,d5))
& (t13 =< t15 & t15 < tre1(r(),dxy(d4,d5),t13)
-> dxy(d4,d5) < dxy(d4,ps1(r(),t15))) , -
5r6 dxy(d4,d5) =< dxy(d4,ps1(r,t0)) , -
206RE ((t0=<t14$ & t14$<tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) -> fe1(r(),t14$))
-> dxy(d4,ps1(r(),tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)))
= dxy(d4,d5))
& (t0 =< t15 & t15 < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
-> dxy(d4,d5) < dxy(d4,ps1(r(),t15))) , -
207sp (t0=<t14$ & t14$ < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) -> fe1(r(),t14$))
-> dxy(d4,ps1(r(),tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)))
= dxy(d4,d5) , -

120**
134sp val(c7,t20) = 1 -> drv(r(),t20) , -

8** wxy(d4,ps1(r,t0)) =< wxy(d4,d5) , -
168**
209re wxy(d4,d5) =< 270
-> ((t0 =< t8$ & t8$ < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
-> drv(r(),t8$))
-> wxy(d4,ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))
= wxy(d4,d5))
& (t0 =< t9 & t9 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
-> wxy(d4,ps1(r(),t9)) < wxy(d4,d5)) , -
7** wxy(d4,d5) =< 270 , -
210RE ((t0 =< t8$ & t8$ < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
-> drv(r(),t8$))
-> wxy(d4,ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))
= wxy(d4,d5))
& (t0 =< t9 & t9 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
-> wxy(d4,ps1(r(),t9)) < wxy(d4,d5)) , -
211sp (t0 =< t8$ & t8$ < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
-> drv(r(),t8$))
-> wxy(d4,ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))
= wxy(d4,d5) , -

51u11 rob(r3,x4)&ha1(r3,s4,t6)
->ort(s4,t6)=ps1(r3,t6)
& win(s4,t6)
=wxy(x4,ps1(r3,t6))-90 ,-
49u9 rob(r2,x3)&ha1(r2,s3,t3)
& (t3=<t5$ & t5$=<t4
-> gr1(r2,t5$))
-> ha1(r2,s3,t4)
&btz(s3,t4)=btz(s3,t0) ,-
213re rob(r3,x4) & rob(r3,x3)
& ha1(r3,s4,t3)
& (t3=<t5$&t5$=<t6
-> gr1(r3,t5$))
->ort(s4,t6)=ps1(r3,t6)
& win(s4,t6)
=wxy(x4,ps1(r3,t6))-90 ,-
47u7 rob(r1,x2) & ps1(r1,t2)=x1
& ort(s2,t2) = x1
&win(s2,t2)=wxy(x2,x1)-90
& gr1(r1,t2)
-> ha1(r1,s2,t2) , -
214re rob(r3,x4)
& rob(r3,x3) & rob(r3,x2)
& ps1(r3,t3) = x1
& ort(s4,t3) = x1
&win(s4,t3)=wxy(x2,x1)-90
& gr1(r3,t3)
& (t3=<t5$&t5$=<t6
-> gr1(r3,t5$))
-> ort(s4,t6)=ps1(r3,t6)
& win(s4,t6)
=wxy(x4,ps1(r3,t6))-90 ,-

```



```

215un rob(r3,x4)
    & rob(r3,x2)&ps1(r3,t3)=x1
    & ort(s4,t3) = x1
    & win(s4,t3)=wxy(x2,x1)-90
    & gr1(r3,t3)
    & (t3 =< t5$ & t5$ =< t6
    -> gr1(r3,t5$))
    -> ort(s4,t6) = ps1(r3,t6)
    & win(s4,t6)
    = wxy(x4,ps1(r3,t6))-90 , -

216un rob(r3,x4)
|    & ps1(r3,t3) = x1
|    & ort(s4,t3) = x1
|    & win(s4,t3)=wxy(x4,x1)-90
|    & gr1(r3,t3)
|    & (t3 =< t5$ & t5$ =< t6
|    -> gr1(r3,t5$))
|    -> ort(s4,t6) = ps1(r3,t6)
|    & win(s4,t6)
|    = wxy(x4,ps1(r3,t6))-90 , -
| 120**
130sp val(c5,t20)=1->gr1(r(),t20) , -
217re rob(r(),x4) & ps1(r(),t3) = x1
    & ort(s4,t3) = x1
    & win(s4,t3)=wxy(x4,x1)-90
    & val(c5,t3) = 1
    & (t3 =< t5$ & t5$ =< t6
    -> gr1(r(),t5$))
    -> ort(s4,t6) = ps1(r(),t6)
    & win(s4,t6)
    =wxy(x4,ps1(r(),t6))-90 , -
130** val(c5,t20)=1 -> gr1(r(),t20) , -
218re rob(r(),x4) & ps1(r(),t3) = x1
    & ort(s4,t3) = x1
    & win(s4,t3)=wxy(x4,x1)-90
    & val(c5,t3) = 1
    & (t3 =< t5$ & t5$ =< t6
    -> val(c5,t5$) = 1)
    -> ort(s4,t6) = ps1(r(),t6)
    & win(s4,t6)
    =wxy(x4,ps1(r(),t6))-90 , -
10** rob(r(),d4) , -
219RE ps1(r(),t3) = x1 & ort(s4,t3) = x1
    & win(s4,t3) = wxy(d4,x1)-90
    & val(c5,t3) = 1
    & (t3 =< t5$ & t5$ =< t6
    -> val(c5,t5$) = 1)
    -> ort(s4,t6) = ps1(r(),t6)
    & win(s4,t6)
    = wxy(d4,ps1(r(),t6))-90 , -
2r3 ps1(r,t0) = d3 , -
220RE ort(s4,t0) = d3
    & win(s4,t0) = wxy(d4,d3)-90
    & val(c5,t0) = 1
    & (t0 =< t5$ & t5$ =< t6
    -> val(c5,t5$) = 1)
    -> ort(s4,t6) = ps1(r(),t6)
    & win(s4,t6)
    = wxy(d4,ps1(r(),t6))-90 , -
1r2 ort(s0,t0) = d3 , -
221RE win(s0,t0) = wxy(d4,d3)-90
    & val(c5,t0) = 1
    & (t0 =< t5$ & t5$ =< t6
    -> val(c5,t5$) = 1)
    -> ort(s0,t6) = ps1(r(),t6)
    & win(s0,t6)
    = wxy(d4,ps1(r(),t6))-90 , -
3r4 win(s0,t0) = wxy(d4,d3)-90 , -
222RE val(c5,t0) = 1
|    & (t0 =< t5$ & t5$ =< t6
|    -> val(c5,t5$) = 1)
|    -> ort(s0,t6) = ps1(r(),t6)
|    & win(s0,t6)
|    = wxy(d4,ps1(r(),t6))-90 , -
|
| 103u69 270-90 = 180 , -

```

```

| 12r20 - , pxy(ps1(r,t)) = pxy(d5)
|           & ort(s0,t) = ps1(r,t)
|           & win(s0,t) = 180 & up(co,t)
223rp - , pxy(ps1(r,t)) = pxy(d5)
|           & ort(s0,t) = ps1(r,t)
|           & win(s0,t) = 270-90 & up(co,t)
224rm - , val(c5,t0) = 1
|           & (t0 =< t5$ & t5$ =< t6
|           -> val(c5,t5$) = 1)
|           & (ort(s0,t6) = ps1(r(),t6)
|           -> pxy(ps1(r,t)) = pxy(d5)
|           & ort(s0,t) = ps1(r,t)
|           & win(s0,t6) = win(s0,t)
|           & wxy(d4,ps1(r(),t6))-90 = 270-90
|           & up(co,t))
94u62 aa = aa , -
225re - , val(c5,t0) = 1
|           & (t0 =< t5$ & t5$ =< t -> val(c5,t5$) = 1)
|           & (ort(s0,t) = ps1(r(),t)
|           -> pxy(ps1(r,t)) = pxy(d5)
|           & ort(s0,t) = ps1(r,t)
|           & wxy(d4,ps1(r(),t))-90=270-90&up(co,t))
226un - , val(c5,t0) = 1
|           & (t0 =< t5$ & t5$ =< t -> val(c5,t5$) = 1)
|           & (ort(s0,t) = ps1(r(),t)
|           -> pxy(ps1(r(),t)) = pxy(d5)
|           & wxy(d4,ps1(r(),t))-90=270-90&up(co,t))
227rm - , val(c5,t0) = 1
|           & (t0 =< t5$ & t5$ =< t -> val(c5,t5$) = 1)
|           & (ort(s0,t) = ps1(r(),t)
|           -> pxy(ps1(r(),t)) = pxy(d5)
|           & wxy(d4,ps1(r(),t)) = 270 & up(co,t))
102u67 wxy(x12,x10) = wxy(x12,x11)
|           & dxy(x12,x10) = dxy(x12,x11)
|           -> pxy(x10) = pxy(x11) , -
228re - , val(c5,t0)=1 & (t0=<t5$&t5$=<t -> val(c5,t5$)=1)
|           & (ort(s0,t) = ps1(r(),t)
|           -> wxy(x12,ps1(r(),t)) = wxy(x12,d5)
|           & dxy(x12,ps1(r(),t)) = dxy(x12,d5)
|           & wxy(d4,ps1(r(),t)) = 270 & up(co,t))
88** wxy(d4,d5) = 270 , -
229RP - , val(c5,t0)=1 & (t0=<t5$ & t5$=<t -> val(c5,t5$)=1)
|           & (ort(s0,t) = ps1(r(),t)
|           -> wxy(x12,ps1(r(),t)) = wxy(x12,d5)
|           & dxy(x12,ps1(r(),t)) = dxy(x12,d5)
|           & wxy(d4,ps1(r(),t)) = wxy(d4,d5) & up(co,t))
230un - , val(c5,t0)=1 & (t0=<t5$ & t5$=<t -> val(c5,t5$) = 1)
|           & (ort(s0,t) = ps1(r(),t)
|           -> wxy(d4,ps1(r(),t)) = wxy(d4,d5)
|           & dxy(d4,ps1(r(),t)) = dxy(d4,d5) & up(co,t))
231re - , (t0 =< t8$ & t8$ < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
|           -> drv(r(),t8$)) & val(c5,t0) = 1
|           & (t0 =< t5$ & t5$ =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
|           -> val(c5,t5$) = 1)
|           & (ort(s0,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
|           = ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
|           -> dxy(d4,ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))
|           = dxy(d4,d5)
|           & up(co,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))
232re - , (t0 =< t8$ & t8$ < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
|           -> val(c7,t8$) = 1) & val(c5,t0) = 1
|           & (t0 =< t5$ & t5$ =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
|           -> val(c5,t5$) = 1)
|           & (ort(s0,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
|           = ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
|           -> dxy(d4,ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))
|           = dxy(d4,d5)
|           & up(co,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))
67u27 rob(r7,x8)
|           & (t16=<t18$ & t18$=<t17 -> ~fa1(r7,t18$) & ~fe1(r7,t18$))
|           -> dxy(x8,ps1(r7,t16)) = dxy(x8,ps1(r7,t17)) , -
233RP - , rob(r(),d4)
|           & (t16 =< t18$ & t18$ =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
|           -> ~fa1(r(),t18$) & ~fe1(r(),t18$))
|           & (t0 =< t8$ & t8$ < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
|           -> val(c7,t8$) = 1) & val(c5,t0) = 1
|           & (t0 =< t5$ & t5$ =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)

```



```

6** mn1 =< dxy(d4,d5) , -
240re ((t0 =< t14$
      & t14$
      < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
      -> fe1(r(),t14$))
      -> dxy(d4,ps1(r(),
      tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)))
      = dxy(d4,d5))
      & (t0 =< t15
      &t15<tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
      -> dxy(d4,d5)
      < dxy(d4,ps1(r(),t15))) , -
241sp (t0 =< t14$
      |
      & t14$
      |
      < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
      |
      -> fe1(r(),t14$))
      |
      -> dxy(d4,ps1(r(),tre1(r(),
      |
      dxy(d4,d5),t0)))
      |
      = dxy(d4,d5) , -
      |
      61u21 rob(r5,x6) & t10 =< t11
      |
      & dxy(x6,ps1(r5,t10))
      |
      < dxy(x6,ps1(r5,t11))
      |
      -> t10<t12$ & t12$<t11
      |
      & fa1(r5,t12$) , -
      |
      10** rob(r(),d4) , -
      |
      243re t10 =< t11
      |
      & dxy(d4,ps1(r(),t10))
      |
      < dxy(d4,ps1(r(),t11))
      |
      -> t10<t12$ & t12$<t11
      |
      & fa1(r(),t12$) , -
      |
      121**
      |
      244re t10 =< t11
      |
      & dxy(d4,ps1(r(),t10))
      |
      < dxy(d4,ps1(r(),t11))
      |
      -> t10 < t12$ & t12$ < t11
      |
      & val(c1,t12$) = 1 , -
      |
      9r10 t0 =< t & t =< trv1(r,270,t0)
      |
      -> ~val(cfa1,t) = 1
      |
      & ~val(cfe1,t) = 1
      |
      & ~val(cdrv,t) = 1
      |
      & ~val(cgr1,t) = 1 , -
      |
      245re t10 =< t11
      |
      & dxy(d4,ps1(r(),t10))
      |
      < dxy(d4,ps1(r(),t11))
      |
      -> t10 < t12$ & t12$ < t11
      |
      & (t0 =< t12$
      -> ~t12$=<trv1(r,270,t0)) , -
      |
      246rp (t0 =< t14$
      |
      & t14$<tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
      |
      -> fe1(r(),t14$))
      |
      & tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<t11
      |
      & dxy(d4,d5)
      |
      < dxy(d4,ps1(r(),t11))
      |
      -> tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<t12$
      |
      < t12$ & t12$ < t11
      |
      & (t0 =< t12$
      -> ~t12$=<trv1(r,270,t0)) , -
      |
      96u66b aa2 < bb1 -> aa2 =< bb1 , -
      |
      247re (t0 =< t14$
      |
      & t14$<tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
      |
      -> fe1(r(),t14$))
      |
      & tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<t11
      |
      & dxy(d4,d5)
      |
      < dxy(d4,ps1(r(),t11))
      |
      ->tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<t12$
      |
      & t12$ < t11 & (t0 < t12$
      -> ~t12$=<trv1(r,270,t0)) , -
      |
      98u66d aa4=<bb3 & bb3<cc1 -> aa4<cc1 , -
      |
      248re (t0 =< t14$
      |
      & t14$<tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
      |
      -> fe1(r(),t14$))
      |
      & tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) =< t11
      |
      & dxy(d4,d5) < dxy(d4,ps1(r(),t11))
      |
      -> tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<t12$
      |
      & t12$<t11 & (t0=<bb3 & bb3 < t12$
      -> ~t12$=< trv1(r,270,t0)) , -

```

```

|
| 70**
253sp t19 =< tre1(r8,d10,t19) , -
257re (t0=<t14$ & t14$<tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
-> fe1(r(),t14$))
& tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<=t11
& dxy(d4,d5) < dxy(d4,ps1(r(),t11))
-> tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<t12$
& t12$<t11 & (tre1(r8,d10,t0) < t12$
-> ~t12$ =< trv1(r,270,t0)) , -
258un (t0 =< t14$ & t14$<tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
-> fe1(r(),t14$))
|
& tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<=t11
|
& dxy(d4,d5) < dxy(d4,ps1(r(),t11))
|
-> tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<t12$
|
& t12$<t11& ~t12$=<trv1(r,270,t0) , -
|
| 95u66 (~bb=<aa1->aa1<bb)&(~bb=<aa1<-aa1<bb) , -
259sp ~bb =< aa1 -> aa1 < bb , -
261re (t0 =< t14$ & t14$<tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
-> fe1(r(),t14$))
& tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<=t11
& dxy(d4,d5) < dxy(d4,ps1(r(),t11))
-> tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<t12$
& t12$<t11 & trv1(r,270,t0)<t12$ , -
105** aaa & bbb -> bbb , -
262re (t0 =< t14$ & t14$ < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
-> fe1(r(),t14$))
& tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) =< t11
& dxy(d4,d5) < dxy(d4,ps1(r(),t11))
-> t12$ < t11 & trv1(r,270,t0) < t12$ , -
97** aa3 < bb2 & bb2 < cc -> aa3 < cc , -
263re (t0=<t14$ & t14$ < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
-> fe1(r(),t14$))
& tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) =< t11
& dxy(d4,d5) < dxy(d4,ps1(r(),t11))
-> (aa3<t12$ -> aa3<t11)
& trv1(r,270,t0)<t12$ , -
264un (t0 =< t14$ & t14$ < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
-> fe1(r(),t14$))
|
& tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) =< t11
|
& dxy(d4,d5) < dxy(d4,ps1(r(),t11))
|
-> trv1(r,270,t0)<t11&trv1(r,270,t0)<t12$ , -
|
| 95** (~bb=<aa1 -> aa1<bb) & (~bb=<aa1 <- aa1 < bb) , -
260sp aa1 < bb -> ~bb =< aa1 , -
265re (t0 =< t14$ & t14$ < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
-> fe1(r(),t14$))
& tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) =< t11
& dxy(d4,d5) < dxy(d4,ps1(r(),t11))
-> ~t11 =< trv1(r,270,t0)
& trv1(r,270,t0) < t12$ , -
137** dxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s5,t20) , -
266RP (t0 =< t14$ & t14$ < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
-> fe1(r(),t14$)&tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<=t20
& dxy(d4,d5) < val(s5,t20)
-> ~t20 =< trv1(r,270,t0) & trv1(r,270,t0) < t12$ , -
160** aa7*-1 < bb6*-1 -> bb6 < aa7 , -
267re (t0 =< t14$ & t14$ < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
-> fe1(r(),t14$)&tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<=t20
& val(s5,t20)*-1 < dxy(d4,d5)*-1
-> ~t20 =< trv1(r,270,t0) & trv1(r,270,t0) < t12$ , -
114** val(ampl(c9,v1),t36) = val(c9,t36)*v1 , -
268RP (t0 =< t14$ & t14$ < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
-> fe1(r(),t14$)&tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<=t36
& val(ampl(c9,-1),t36) < dxy(d4,d5)*-1
-> ~t36 =< trv1(r,270,t0) & trv1(r,270,t0) < t12$ , -
152** val(trg(c25,v),t32) = 1 -> val(c25,t32) < v , -
269re (t0 =< t14$ & t14$ < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
-> fe1(r(),t14$)&tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<=t36
& val(trg(ampl(c9,-1),dxy(d4,d5)*-1),t36) = 1
-> ~t36 =< trv1(r,270,t0) & trv1(r,270,t0) < t12$ , -
124** val(c3,t20) = 1 -> fe1(r(),t20) , -
270re (t0 =< t14$ & t14$ < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
-> val(c3,t14$) = 1)
|
& tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) =< t36
|
& val(trg(ampl(c9,-1),dxy(d4,d5)*-1),t36) = 1

```



```

114** val(aml(c9,v1),t36) = val(c9,t36)*v1 , -
290RP t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27
      & ~val(c20,t31$)*v7 < v6
      & ~val(c25,t31$) < v & t23$ < t31$
      -> t23$ < t36 & t36 < t31$
      & ~val(c20,t36)*v7 < v6
      & ~val(c25,t36) < v)
      -> val(dff(ci,neg(or(trg(aml(c20,v7),
v6),trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
160** aa7*-1 < bb6*-1 -> bb6 < aa7 , -
291re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27
      & ~val(c20,t31$)*-1 < bb6*-1
      & ~val(c25,t31$) < v & t23$ < t31$
      -> t23$ < t36 & t36 < t31$
      & ~bb6 < val(c20,t36) & ~val(c25,t36) < v)
      -> val(dff(ci,neg(or(trg(aml(c20,-1),
bb6*-1),trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
161** bb6 < aa7 -> aa7*-1 < bb6*-1 , -
292re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27
      & ~bb6 < val(c20,t31$) & ~val(c25,t31$) < v
      & t23$ < t31$ -> t23$ < t36 & t36 < t31$
      & ~bb6 < val(c20,t36) & ~val(c25,t36) < v)
      -> val(dff(ci,neg(or(trg(aml(c20,-1),bb6*-1),
trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
137** dxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s5,t20) , -
293RP t0=<t27 & (t0=<t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < val(s5,t31$)
      & ~val(c25,t31$) < v & t23$ < t31$
      -> t23$ < t20 & t20 < t31$
      & ~bb6<dxy(d4,ps1(r(),t20)) & ~val(c25,t20) < v)
      -> val(dff(ci,neg(or(trg(aml(s5,-1),bb6*-1),
trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
137** dxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s5,t20) , -
294RP t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27
      & ~bb6<dxy(d4,ps1(r(),t31$)) & ~val(c25,t31$) < v
      & t23$ < t31$ -> t23$ < t20 & t20 < t31$
      & ~bb6<dxy(d4,ps1(r(),t20)) & ~val(c25,t20) < v)
      -> val(dff(ci,neg(or(trg(aml(s15,-1),bb6*-1),
trg(c25,v))))),t27) = 1 , -
139** wxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s7,t20) , -
295RP t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27
      & ~bb6<dxy(d4,ps1(r(),t31$)) & ~val(s16,t31$) < v
      & t23$ < t31$ -> t23$ < t39 & t39 < t31$
      & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t39))
      & ~wxy(d4,ps1(r(),t39)) < v)
      -> val(dff(ci,neg(or(trg(aml(s15,-1),bb6*-1),
trg(s16,v))))),t27) = 1 , -
139** wxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s7,t20) , -
296RP t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27
      & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t31$))
      & ~wxy(d4,ps1(r(),t31$)) < v & t23$ < t31$
      -> t23$ < t39 & t39 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t39))
      & ~wxy(d4,ps1(r(),t39)) < v)
      -> val(dff(ci,neg(or(trg(aml(s15,-1),bb6*-1),
trg(s18,v))))),t27) = 1 , -
172**
297re t0=<t27 & (t0=<t31$ & t31$<t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t31$))
      & ~t31$ < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0) & t23$ < t31$
      -> t23$ < t39 & t39 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t39))
      & ~wxy(d4,ps1(r(),t39)) < wxy(d4,d5))
      -> val(dff(ci,neg(or(trg(aml(s15,-1),bb6*-1),
trg(s18,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
97** aa3 < bb2 & bb2 < cc -> aa3 < cc , -
298re t0=<t27 & (t0=<t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t31$))
      & (t31$ < bb2 -> ~bb2 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
      & t23$ < t31$ -> t23$ < t39 & t39 < t31$
      & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t39))
      & ~wxy(d4,ps1(r(),t39)) < wxy(d4,d5))
      -> val(dff(ci,neg(or(trg(aml(s15,-1),bb6*-1),
trg(s18,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
299un t0=<t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t31$))
      & ~t27 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0) & t23$ < t31$
      -> t23$ < t39 & t39 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t39))
      & ~wxy(d4,ps1(r(),t39)) < wxy(d4,d5))
      -> val(dff(ci,neg(or(trg(aml(s15,-1),bb6*-1),
trg(s18,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
104** aaa & bbb -> aaa , -
300re t0 =< t27 & (t0 =< t31$ & t31$ < t27 & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t31$))

```



```

| | | & ~t27 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
| | | -> t23$ < t39 & t39 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t39))
| | | & ~wxy(d4,ps1(r(),t39)) < wxy(d4,d5))
| | | -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s15,-1),bb6*-1),
| | |   trg(s18,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
| | | 104** aaa & bbb -> aaa , -
| | | 301re t0=<t27 & (t0 <= t31$ & t31$ < t27 & ~t27 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
| | |   -> t23$ < t39 & t39 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t39))
| | |   & ~wxy(d4,ps1(r(),t39)) < wxy(d4,d5))
| | |   -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s15,-1),bb6*-1),
| | |     trg(s18,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
| | | 104** aaa & bbb -> aaa , -
| | | 302re t0 <= t27 & (t0 <= t31$ & ~t27 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
| | |   -> t23$ < t39 & t39 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t39))
| | |   & ~wxy(d4,ps1(r(),t39)) < wxy(d4,d5))
| | |   -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s15,-1),bb6*-1),
| | |     trg(s18,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
| | | 105** aaa & bbb -> bbb , -
| | | 303re t0 <= t27 & (~t27 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
| | |   -> t23$ < t39 & t39 < t31$ & ~bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t39))
| | |   & ~wxy(d4,ps1(r(),t39)) < wxy(d4,d5))
| | |   -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s15,-1),bb6*-1),
| | |     trg(s18,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
| | | 106** aaa -> ~aaa -> bbb , -
| | | 304re t0 <= t27 & t27 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
| | |   -> val(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s15,-1),bb6*-1),
| | |     trg(s18,wxy(d4,d5))))),t27) = 1 , -
| | | 119**
| | | 305RE val(ca1,t34)=1 ! t0=<t34 & t34 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0) & val(cb2,t34) = 1
| | |   -> val(or(ca1,and(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s15,-1),bb6*-1),
| | |     trg(s18,wxy(d4,d5))))),cb2)),t34) = 1 , -
| | |
| | | 114** val(ampl(c9,v1),t36) = val(c9,t36)*v1 , -
| | | 153** val(c25,t32) < v -> val(trg(c25,v),t32) = 1 , -
| | | 306rp val(c9,t36)*v1 < v -> val(trg(ampl(c9,v1),v),t36) = 1 , -
| | | 161** bb6 < aa7 -> aa7*-1 < bb6*-1 , -
| | | 307re bb6 < val(c9,t36) -> val(trg(ampl(c9,-1),bb6*-1),t36) = 1 , -
| | | 137** dxy(d4,ps1(r(),t20)) = val(s5,t20) , -
| | | 308RP bb6 < dxy(d4,ps1(r(),t20)) -> val(trg(ampl(s5,-1),bb6*-1),t20) = 1 , -
| | | 309re val(ca1,t34) = 1 ! t0 <= t34 & t34 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
| | |   & bb7 < dxy(d4,ps1(r(),t34))
| | |   -> val(or(ca1,and(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s15,-1),bb6*-1),
| | |     trg(s18,wxy(d4,d5))))),trg(ampl(s5,-1),bb7*-1))),t34) = 1 , -
| | |
| | | 240**
| | | 242sp t0=<t15&t15<tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)->dxy(d4,d5)<dxy(d4,ps1(r(),t15)) , -
| | | 310re val(ca1,t34) = 1 ! t0 <= t34 & t34 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
| | |   & t34 < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
| | |   -> val(or(ca1,and(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s15,-1),bb6*-1),
| | |     trg(s18,wxy(d4,d5))))),trg(ampl(s5,-1),dxy(d4,d5)*-1))),t34) = 1 , -
| | | 97** aa3 < bb2 & bb2 < cc -> aa3 < cc , -
| | | 311re val(ca1,t34) = 1 ! t0 <= t34 & t34 < bb2 & bb2 < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
| | |   & t34 < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
| | |   -> val(or(ca1,and(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s15,-1),bb6*-1),
| | |     trg(s18,wxy(d4,d5))))),trg(ampl(s5,-1),dxy(d4,d5)*-1))),t34) = 1 , -
| | | 312un val(ca1,t34) = 1 ! t0 <= t34 & t34 < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
| | |   & tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
| | |   -> val(or(ca1,and(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s15,-1),bb6*-1),
| | |     trg(s18,wxy(d4,d5))))),trg(ampl(s5,-1),dxy(d4,d5)*-1))),t34) = 1 , -
| | |
| | | 89u47a rob(r9,d4) & ps1(r9,t21) = d3
| | |   -> tre1(r9,dxy(d4,d5),t21) < trv1(r9,wxy(d4,d5),t21) , -
| | | 10** rob(r(),d4) , -
| | | 313re ps1(r(),t21) = d3 -> tre1(r(),dxy(d4,d5),t21) < trv1(r(),wxy(d4,d5),t21) , -
| | | 2** ps1(r,t0) = d3 , -
| | | 314re tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0) , -
| | | 315re val(ca1,t34) = 1 ! t0 <= t34 & t34 < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)
| | |   -> val(or(ca1,and(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s15,-1),bb6*-1),
| | |     trg(s18,wxy(d4,d5))))),trg(ampl(s17,-1),dxy(d4,d5)*-1))),t34) = 1 , -
| | | 316re - , (t0 <= t14$ & t14$ < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) -> val(cfe1,t14$) = 1
| | |   ! t14$ < tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)) & (tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) <= t18$
| | |   & t18$ <= trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
| | |   -> ~val(cfa1,t18$) = 1) & (t0 <= t8$ & t8$ < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
| | |   -> val(c15,t8$) = 1)
| | |   & (ort(s0,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)) = ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
| | |   -> up(co,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))
| | | 317un - , (tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)<t18$&t18$<trv1(r(),wxy(d4,d5),t0) -> ~val(cfa1,t18$)=1)

```

```

& (t0 =< t8$ & t8$ < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0) -> val(c21,t8$) = 1)
& (ort(s0,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)) = ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
-> up(co,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))
318re - , (tre1(r(),dxy(d4,d5),t0)=<t18$ & t18$=<trv1(r(),wxy(d4,d5),t0) -> ~val(cfa1,t18$)=1)

& (t0 =< t8$ & t8$ < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
-> val(ca1,t8$) = 1 ! t8$ < trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
& (ort(s0,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)) = ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
-> up(co,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))
319un - , (tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) =< t18$ & t18$=<trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
-> ~val(cfa1,t18$)=1)
& (ort(s0,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)) = ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
-> up(co,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))

9**
320re - , (tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) =< t18$ & t18$ =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
-> t0 =< t18$ & t18$ =< trv1(r,270,t0))
& (ort(s0,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)) = ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
-> up(co,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))

88u47 wxy(d4,d5) = 270 , -
321RP - , (tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) =< t18$ & t18$ =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
-> t0 =< t18$ & t18$ =< trv1(r,wxy(d4,d5),t0))
& (ort(s0,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)) = ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
-> up(co,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))

322un - , (tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) =< t18$ & t18$ =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0) -> t0 =< t18$)
& (ort(s0,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)) = ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
-> up(co,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))

100** aa6 =< bb5 & bb5 =< cc3 -> aa6 =< cc3 , -
323re - , (tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) =< t18$ & t18$ =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
-> t0 =< bb5 & bb5 =< t18$)
& (ort(s0,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)) = ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
-> up(co,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))

253** t19 =< tre1(r8,d10,t19) , -
324re - , (tre1(r(),dxy(d4,d5),t0) =< t18$ & t18$ =< trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)
-> tre1(r8,d10,t0) =< t18$)
& (ort(s0,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)) = ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
-> up(co,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0)))

325un - , ort(s0,trv1(
r(
cfa1,
or(cfe1,
and(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s22,-1),dxy(d4,d5)*-1),trg(s10,wxy(d4,d5))))),
trg(ampl(s22,-1),dxy(d4,d5)*-1)
) ),
c31,
c32,
or(cgr1,dff(ci,neg(or(trg(ampl(s22,-1),dxy(d4,d5)*-1),trg(s10,wxy(d4,d5)))))),
c34,
or(cdrv,
and(dff(ci,neg(or(trg(ampl(s22,-1),dxy(d4,d5)*-1),trg(s10,wxy(d4,d5))))),
trg(s10,wxy(d4,d5))
) ),
c36,
s22,
s23,
s10
),
wxy(d4,d5),t0))
= ps1(r(),trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))
-> up(co,trv1(r(),wxy(d4,d5),t0))

```